



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ALEKSI FLANKKUMÄKI
PUURUNKOISEN VÄLI- JA YLÄPOHJAN LEVYJÄYKISTYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Sami Pajunen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty koulu-
tusvaradekaanin päätöksellä 2. tou-
kokuuta 2018.

TIIVISTELMÄ

ALEKSI FLANKKUMÄKI: Puurunkoisen väli- ja yläpohjan levyjäykistys
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 75 sivua, 47 liitesivua
Kesäkuu 2018
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Rakennesuunnittelu
Tarkastaja: professori Sami Pajunen

Avainsanat: levyjäykistys, jäykistystaso, jäykkyys

Tämä diplomityö on osa puurunkoisten levyjäykistystasojen tutkimusprojektin käynnistysvaihetta, jonka tavoitteena on kehittää Suomessa nykyisin käytössä olevat levyjäykistystasojen suunnitteluohjeet kattavampaan ja tarkempaan muotoon. Työn tavoitteena on muodostaa lähtökohdat projektin toteutukseen.

Diplomityön kirjallisuuskatsauksessa perehdytään tällä hetkellä olemassa oleviin kotimaisiin ja kansainvälisiin levyjäykistystasojen suunnitteluohjeisiin, joita verrataan Suomessa aiemmin kehitettyyn suunnittelumenetelmään, jonka on tarkoitus toimia sellaisenaan tutkimusprojektin teoriataustana. Lisäksi tehdään suunnitteluohjeiden laskennallinen vertailu, jolla selvennetään menetelmien eroja konkreettisten tasoesimerkkien avulla. Vertailussa havaittiin, että Suomessa nykyisin käytössä olevat suunnittelumenetelmät sekä uusi laskentateoria vaativat kehittämistä tason rakennemallin, monimuotoisuuden, jatkuvuuden ja yksityiskohtien suunnittelun osalta.

Yhdysvalloissa ja Kanadassa levyjäykistystason rakennemalli määritetään jäykäksi, osittain jäykäksi tai joustavaksi tasoksi raja-arvojen mukaan. Raja-arvot muodostuvat tason muotosuhteista ja jäykistysrakenteiden suhteellisista jäykkyyksistä. Sekä Suomessa nykyisin käytössä olevat että Leskelän suunnitteluohje olettavat tason rakennemallin joustavaksi palkiksi, mikä voi tietyissä tapauksissa johtaa epävarmalla puolella oleviin jäykistysrakenteiden voimasuureisiin. Lisäksi ohjeet olettavat, että jäykistystasot ovat yksiaukkoisia, suorakaiteen muotoisia ja nivelellisesti pystyjäykisteisiin tuettuja. Monimuotoisemmissa rakennuksissa oletetaan, että tasot voidaan jakaa yksiaukkoisiksi suorakaiteiksi rakennuksen muotojen tai aukkojen mukaan. Oletus tasojen epäjatkuvuudesta ja nivelellisistä liitoksista pystyjäykisteisiin ei kaikissa tapauksissa ole pätevä, mikä voi johtaa virheellisiin jäykistysrakenteiden suunnitteluratkaisuihin. Lisäksi tason aukkojen reunavahvistuksiin ei oteta kantaa Suomen nykyisissä tai Leskelän suunnitteluohjeessa, mutta Yhdysvalloissa ja Kanadassa näille on esitetty vahvistusperiaatteet.

Havaittujen puutteiden perusteella tässä diplomityössä määritetään suunnitteluohjeen kehitysprosessi, jota voidaan käyttää tulevan tutkimusprosessin lähtökohtana. Levyjäykistystasojen ongelmakohdat avataan erityispiirteineen, sekä esitetään näihin soveltuvat lisätutkimusmenetelmät. Järkevimmäksi lähestymismalliksi todettiin elementtimenetelmään (FEM) perustuva tietokoneavusteinen laskenta, jolla voidaan taloudellisesti tutkia riittävä määrä erilaisia jäykistysrakennekokonaisuuksia liitoksineen. Tulosten analysoinnin perusteella tulee suunnitella koekuormitusjärjestelyt, joilla määritetyt teoriat todennetaan. Työn johtopäätöksenä esitetään parannetun levyjäykistystasojen suunnitteluohjeen sisältö.

ABSTRACT

ALEKSI FLANKKUMÄKI: Wood framed floor and roof diaphragms

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 75 pages, 47 Appendix pages

June 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Sami Pajunen

Keywords: diaphragm, bracing plane, rigidity

This master's thesis is a part of the research project which target is to develop Finnish wood diaphragm design manuals to more exact and comprehensive form. The target of this thesis is to generate basis for the research project.

Finnish and international wood diaphragm design manuals will be reviewed in the literary survey. Design manuals will be compared with newer design manual which is developed in Finland. Newer design manual's purpose is to be research project's design theory. Furthermore, computational comparison between design manuals will be done. Comparison between design manuals revealed that both Finnish design manuals and newer theory should be developed. Targets for development are diaphragm structural models, multiformity, continuity and design of diaphragm details.

In USA and Canada diaphragm's structural model is determined as rigid, stiff or flexible on the grounds of limit values. Limit values are formed from diaphragm dimensions and relative rigidities of bracing structures. Both Finnish present and newer design manual suppose that structural model is flexible beam which could lead to unsafe determination of vertical bracing forces. Furthermore, design manuals assume that diaphragms are single span, rectangular and joints to vertical bracing structures are fixed. In multiformity buildings it is assumed that bracing planes could be divided into rectangular single span parts according to building's shape or openings. Assumption of diaphragm discontinuity and fixed joints to vertical bracing structures is not valid in every case, which could lead to unsafe design decisions in bracing structures. In addition, both Finnish present and newer design manual don't take diaphragm opening reinforcements into account, but in USA and Canada design manuals include reinforcement principles.

On the grounds of found imperfections the development process of diaphragm design manuals will be determined in this thesis. Development process could be used as a basis of research project. The problematics and special characteristics of diaphragms will be opened, and further research methods will be proposed. It was found that the most reasonable further research method could be finite-element method-based computer aided calculation which enables economic research of sufficient number of bracing structure and joint combinations. Loading tests should be designed after analysis of FEM-calculations which will verify the new theory. As a conclusion of this thesis is content of the new diaphragm design manual.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratoriolle. Kiitän Sami Pajusta mielenkiintoisen diplomityöaiheen tarjoamisesta ja asiantuntevasta ohjauksesta. Kiitokset myös Arto Hyttiselle, Harri Kemppaiselle ja Marko Saikokoselle tarpeellisista kommenteista ja näkemyksistä.

Kiitos tuesta perheelleni, ystäväilleni ja ennen kaikkea vaimolleni Emmille, joka on toiminut tärkeimpänä taustatukena koko opiskelujeni ajan.

Tampereella, 9.5.2018

Aleksi Flankkumäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Diplomityön tavoitteet ja sisältö	1
2.	OLEMASSA OLEVAT SUUNNITTELUOHJEET	3
2.1	EN 1995-1-1, Eurooppa	3
2.2	RIL 205-1-2017, Suomi	8
2.3	Design of timber structures, Ruotsi	18
2.4	Design of Wood Structures, USA	23
2.5	Wood design manual 2015, Kanada.....	35
3.	KIMMOTEORIAAN PERUSTUVA SUUNNITTELUMENETELMÄ.....	45
3.1	Levyjäykistykseen suunnittelu	45
3.2	Vertailu olemassa oleviin suunnitteluohjeisiin	60
4.	SUUNNITTELUOHJEEN KEHITYS.....	67
4.1	Lähtökohdat.....	67
4.2	Kehitystarpeet ja tutkimusmenetelmät	67
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET	71
5.1	Parannetun levyjäykistystasojen suunnitteluohjeen sisältö	71
5.2	Loppuyhteenveto	72
	LÄHTEET	74

LIITE 1: RIL 205-1-2017 KIINNITYSTAPAKERTOIMET

LIITE 2: RIL 205-1-2017 LOMMAHDUSKERROINKÄYRÄ

LIITE 3: ASCE/SEI 7-16 TAULUKKO 12.12-1, MUOKATTU

LIITE 4: SDPWS 2015 MITOITUSTAULUKKOESIMERKKI

LIITE 5: WOOD DESIGN MANUAL 2015 MITOITUSTAULUKKOESIMERKKI

LIITE 6: WOOD DESIGN MANUAL 2015 KIINNIKERIVIKERTOIMET

LIITE 7: WOOD DESIGN MANUAL 2015 LUJUUSKERTOIMET

LIITE 8: LESKELÄ 2005 KIINNITYSTAPAKERTOIMET

LIITE 9: KIINNITYSTAPAKERTOIMIEN MUUNNOSKAAVAT

LIITE 10: YHTEENVETO SUUNNITTELUYHTÄLÖISTÄ

LIITE 11: SUUNNITTELUOHJEEN KEHITYKSESSÄ VAADITTAVAT FEM-ANALYYSIT

LIITE 12: SUUNNITTELUOHJEIDEN LASKENNALLINEN VERTAILU

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Vaakasuuntaisen levyjäykistystason rakennemalli ja leikkausvoimakuvio (SFS-EN-1995-1-1, kuva 9.4, muokattu).....</i>	<i>4</i>
Kuva 2.	<i>Levyjen epäjatkokuvan reunan kiinnitys (SFS-EN 1995-1-1, kuva 10.1).....</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Eurokoodin mukainen levyn kiinnitystapa (Leskelä 2005, kuva 2.2)</i>	<i>7</i>
Kuva 4.	<i>Levyjen tyypilliset kiinnitystavat (Leskelä 2005, kuva 2.3)</i>	<i>7</i>
Kuva 5.	<i>Yleisen mitoitusmenetelmän levyjäykistystason rakennemalli ja leikkausvoimakuvio (RIL 205-1-2017, kuva 9.14aS, muokattu).....</i>	<i>9</i>
Kuva 6.	<i>Parabolisesti jakaantunut leikkausjännityskenttä (Salmi & Pajunen 2010, kuva 196.2)</i>	<i>11</i>
Kuva 7.	<i>Lommahdustarkastelussa käsiteltävät levyt (RIL 205-1-2017, kuva 9.14fS, muokattu)</i>	<i>12</i>
Kuva 8.	<i>Tason taivutusmomenttikuvio ja reunapalkkien normaalivoimat (RIL 205-1-2017, kuva 9.14dS, muokattu)</i>	<i>15</i>
Kuva 9.	<i>Leikkausvoiman aiheuttama siirtymä yksiaukkoiselle levyjäykistystasolle (RIL 205-1-2017, kuva 9.14bS, muokattu)</i>	<i>16</i>
Kuva 10.	<i>Jäykän tason siirtämät kuormitukset jäykistäville pystyrakenteille (Design of timber structures Volume 1, kuva 6.8).....</i>	<i>19</i>
Kuva 11.	<i>Osittain jäykän tason toiminta (Design of timber structures Volume 1, kuva 6.9 b)).....</i>	<i>20</i>
Kuva 12.	<i>Joustavan tason toiminta (Design of timber structures Volume 1, kuva 6.9b)).....</i>	<i>20</i>
Kuva 13.	<i>Joustavan levyjäykistystason toiminta hallirakennuksen yläpohjana (Design of timber structures Volume 1, kuva 6.34).....</i>	<i>21</i>
Kuva 14.	<i>Levyjäykistystason analogia I-palkkiin (Design of timber structures Volume 1, kuva 6.35)</i>	<i>22</i>
Kuva 15.	<i>Levyjäykistystason rakennemallin määrityksessä käytettävät suureet (ASCE/SEI 7-16 2017, kuva 12.3-1)</i>	<i>25</i>
Kuva 16.	<i>Levyjäykistystason rakenneosat eri kuormitusuuntatapauksissa (Breyer et al. 2016, kuva 9.2)</i>	<i>26</i>
Kuva 17.	<i>Jäykistyslevyn leikkautuminen (Breyer et al. 2016, kuva 8.21a).....</i>	<i>27</i>
Kuva 18.	<i>Tasokuva levyjäykistystasosta, jossa on käytetty avointa levyjen kiinnitystapaa (Breyer et al.2016, kuva 9.5a)</i>	<i>28</i>
Kuva 19.	<i>Tasokuva levyjäykistystasosta, jossa on käytetty suljettua levyjen kiinnitystapaa (Breyer et al.2016, kuva 9.5b)</i>	<i>29</i>
Kuva 20.	<i>Levyjäykistystason reunapalkkiratkaisu muuratuissa seinissä (Breyer et al. 2016, kuva 9.8)</i>	<i>30</i>
Kuva 21.	<i>Yksiaukkoiset levyjäykistystasot väliseinällisessä rakennuksessa (Breyer et al. 2016, kuva 9.17a)</i>	<i>33</i>

Kuva 22.	<i>Aukon reunavahvistuksen jatkuvuus (2015 International Building Code 2014, kuva 2308.4.4.1(1))</i>	34
Kuva 23.	<i>Kuormien jakaantuminen jäykistysrakenteille (Wood Design Manual 2015, kuva 8.1)</i>	35
Kuva 24.	<i>Levyjäykistystason vapaakappalekuva (Wood Design Manual 2015, kuva 8.2)</i>	37
Kuva 25.	<i>Reunapalkin jatkoksien toteutusesimerkit (Wood Design Manual 2015, kuva 8.3)</i>	38
Kuva 26.	<i>Levyjäykistystason ja sivuseinän välisen liitoksen rakenneleikkaukset (Wood Design Manual 2015, kuva 8.4)</i>	39
Kuva 27.	<i>Tuulikuorman jakaantuminen jäykistysrakenteille teollisuusrakennuksessa (Leskelä 2005, kuva 4.1)</i>	46
Kuva 28.	<i>Tuulikuorman jakaantuminen jäykistysrakenteille monikerroksisessa asuinrakennuksessa (Leskelä 2005, kuva 4.2)</i>	47
Kuva 29.	<i>Levykentän jakautuminen yksittäisiin levyihin kohtisuorassa suunnassa kuormitukseen nähden (Leskelä 2005, kuva 4.15a)</i>	48
Kuva 30.	<i>Levykentän jakautuminen yksittäisiin levyihin kuormituksen suunnassa (Leskelä 2005, kuva 4.15b)</i>	48
Kuva 31.	<i>Levyjäykistystason rakennemalli (Leskelä 2005, kuva 3.10)</i>	49
Kuva 32.	<i>Tason reunapalkkien rasitukset (Leskelä 2005, kuva 3.11)</i>	50
Kuva 33.	<i>Tason reunapalkin rakenneleikkaus (Leskelä 2005, kuva 4.4)</i>	50
Kuva 34.	<i>Leikkausvoimien jakaantuminen levykentässä (Leskelä, kuva 3.12)</i>	51
Kuva 35.	<i>Kiinnitystapakertoimien johtamisessa käytetty levyn rakennemalli (Leskelä 2005, kuva 3.3)</i>	53
Kuva 36.	<i>Tarkasteltavan levyn siirtymä kuormitettuna (Leskelä 2005, kuva 3.4)</i>	54
Kuva 37.	<i>Tarkasteltavan levyn liittimissä vaikuttavien leikkausvoimien jakaumat (Leskelä 2005, kuvat 3.5 ja 3.6)</i>	55
Kuva 38.	<i>Tarkasteltavan levyn leikkausmuodonmuutos (Leskelä 2005, kuva 3.7)</i>	56
Kuva 39.	<i>Leikkausvoimista aiheutuva levykentän siirtymä (Leskelä 2005, kuva 3.13)</i>	59
Kuva 40.	<i>Liittimien vähimmäisetäisyydet (Leskelä 2005, kuva 4.17)</i>	60
Kuva 41.	<i>Pystyjäykisteiden tukireaktioiden vaihtelu tason erilaisilla jäykkyysoletuksilla</i>	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AITC	American Institute of Timber Construction
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASD	Allowable Stress Design
AWC	American Wood Council
CEN	Comité Européen de Normalisation, eurooppalainen standardisointijärjestö
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
IBC	International Building Code
ICC	International Code Council
LRFD	Load and Resistance Factor Design
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
SDPWS	Special Design Provisions for Wind and Seismic
TTY	Tampereen Teknillinen Yliopisto
A	Palkin poikkileikkauksen pinta-ala (Salmi & Pajunen 2010)
A	Reunapalkin poikkileikkauksen pinta-ala (SDPWS 2015)
A_p	Reunapalkin poikkileikkauksen pinta-ala (RIL 205-1-2017)
a	Jäykistyslevyn pituus (Wood Design Manual 2015)
a	Rakennuksen harjan ja yläpohjan jäykistystason välinen pystysuuntainen etäisyys (Leskelä 2005)
a_i	Jäykistyslevyn tukien k-jako levyn pituussuunnassa (RIL 205-1-2017)
B	Jäykistyslevyn leveys (Leskelä 2005)
$B_{a,0}$	Jäykistyslevyn aksiaalijäykkyys 0° suunnassa standardin CSA O86 mukaan (Wood Design Manual 2015)
$B_{a,90}$	Jäykistyslevyn aksiaalijäykkyys 90° suunnassa standardin CSA O86 mukaan (Wood Design Manual 2015)
B_v	Jäykistyslevyn liukumoduuli standardin CSA O86 mukaan (Wood Design Manual 2015)
b	Levyjäykistystason leveys (EN 1995-1-1, 2015 International Building Code 2014, Wood Design Manual 2015)
b	Poikkileikkauksen leveys leikkausjännitystarkastelussa (Salmi & Pajunen 2010)
b	Palkin leveys neliömomentin määrittämisessä (Salmi & Pajunen 2010)
b	Reunapalkkien välinen etäisyys (Design of timber structures Volume 1)
b_i	Jäykistyslevyn leveys (RIL 205-1-2017)
$b(\bar{y})$	Poikkileikkauksen leveys kohdalla \bar{y} (Salmi & Pajunen 2010)
C	Reunapalkissa vaikuttava puristusvoima (Design of timber structures Volume 1)
$C_{i,v}$	Yksittäisen levyn jäykkyyskerroin (RIL 205-1-2017)
$\sum C_{i,v}$	Levyjonossa olevien levyjen jäykkyyskertoimien summa (RIL 205-1-2017)
c_i	Jäykistyslevyn tukien k-jako levyn leveyssuunnassa (RIL 205-1-2017)
d	Reunapalkkien etäisyys toisistaan (RIL 205-1-2017)
d	Jäykistystason leveys (Leskelä 2005)
d	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen halkaisija (Leskelä 2005)

d_f	Jäykistyslevyn kiinnitysnaulan halkaisija (Wood Design Manual 2015)
E	Rakenteen kimmomoduuli (Salmi & Pajunen 2010)
E	Reunapalkin kimmomoduuli (SDPWS 2015, Wood Design Manual 2015)
E_i	Jäykistyslevyn taivutuskimmomoduulin ominaisarvo (RIL 205-1-2017)
E_p	Reunapalkin kimmomoduuli (RIL 205-1-2017)
e_n	Hakasen liukuma (2015 International Building Code 2014)
e_n	Liittimen liukuma (Wood Design Manual 2015)
$(EI)_{z,i}$	Jäykistyslevyn taivutusjäykkyys pituusyksikköä kohti, kun levyä taivutetaan z-akselin ympäri (RIL 205-1-2017)
$(EI)_{x,i}$	Jäykistyslevyn taivutusjäykkyys pituusyksikköä kohti, kun levyä taivutetaan x-akselin ympäri (RIL 205-1-2017)
F	Jäykistyslevyn yläreunan pistevoima (Leskelä 2005)
$F_{f,Rd,i}$	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo (RIL 205-1-2017)
$F_{i,v,Ed}$	Yksittäistä levyä kuormittava vaakavoima murtorajatilassa (RIL 205-1-2017)
$F_{i,v,Ek}$	Yksittäistä jäykistyslevyä kuormittava vaakavoima käyttörajatilassa (RIL 205-1-2017)
$F_{i,v,Rd}$	Levyn ja rungon välisen liitoksen leikkausvoimakestävyys murtorajatilassa (RIL 205-1-2017)
F_{max}	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimissä vaikuttavan leikkausvoiman maksimiarvo (Leskelä 2005)
F_v	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimeen vaikuttava leikkausvoima (Design of timber structures Volume 1)
$F_{v,Ed}$	Levyjonoa kuormittava vaakavoima murtorajatilassa (RIL 205-1-2017)
F_x	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimessä vaikuttava leikkausvoiman x-komponentti (Leskelä 2005)
F_{xi}	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimessä vaikuttava vaakasuuntainen leikkausvoima (Leskelä 2005)
F_y	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimessä vaikuttava leikkausvoiman y-komponentti (Leskelä 2005)
F_{yi}	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimessä vaikuttava pystysuuntainen leikkausvoima (Leskelä 2005)
$f_{c,z,d}$	Jäykistyslevyn puristuslujuuden mitoitusarvo z-suunnassa (RIL 205-1-2017)
$f_{t,z,d}$	Jäykistyslevyn vetolujuuden mitoitusarvo z-suunnassa (RIL 205-1-2017)
$f_{v,crit,i}$	Jäykistyslevyn kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen (RIL 205-1-2017)
$f_{v,d,i}$	Jäykistyslevyn paneelileikkauslujuuden mitoitusarvo (RIL 205-1-2017)
G	Jäykistyslevyn liukumoduuli (Leskelä 2005)
G_a	Jäykistyslevyn liukumoduuli (SDPWS 2015)
G_i	Jäykistyslevyn liukumoduulin ominaisarvo, paneelileikkaus (RIL 205-1-2017)
$G_{mean,i}$	Jäykistyslevyn liukumoduuli, paneelileikkaus (RIL 205-1-2017)

G_t	Jäykistyslevyn liukumoduuli (2015 International Building Code 2014)
$(GI)_{v,i}$	Jäykistyslevyn vääntöjäykkyys (RIL 205-1-2017)
H	Rakennuksen tarkastelupisteen korkeus siirtymätarkastelussa (RIL 205-1-2017)
H	Jäykistyslevyn korkeus (Leskelä 2005)
h	Poikkileikkauksen korkeus leikkausjännitystarkastelussa (Salmi & Pajunen 2010)
h	Palkin korkeus neliömomentin määrittämisessä (Salmi & Pajunen 2010)
h	Reunapalkkien keskipisteiden välinen etäisyys (Wood Design Manual 2015)
h	Kerroskorkeus (Leskelä 2005)
h	Rakennuksen siirtymän tarkastelupisteen korkeus (Leskelä 2005)
h_i	Jäykistyslevyn korkeus (RIL 205-1-2017)
I	Rakenteen neliömomentti (Salmi & Pajunen 2010)
I_i	Jäykistyslevyn jäyhyysmomentti pituusyksikköä kohti (RIL 205-1-2017)
I_z	Poikkileikkauksen neliömomentti (Salmi & Pajunen 2010)
J_D	Kerroin levyjäykistystasojen ja -seinien liittimille (Wood Design Manual 2015)
J_f	Kiinnikerivikerroin (Wood Design Manual 2015)
J_s	Liitinjakokerroin (Wood Design Manual 2015)
J_{ud}	Lujuuskerroin avoimille levykentille (Wood Design Manual 2015)
K	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen siirtymäkerroin (Leskelä 2005)
K_D	Kuormitusaikakerroin (Wood Design Manual 2015)
K_{pb}	Lommahduskerroin (Wood Design Manual 2015)
K_S	Käyttötapakerroin puurakennuslevylle (Wood Design Manual 2015)
K_{SF}	Käyttötapakerroin liitoksille (Wood Design Manual 2015)
$K_{ser,i}$	Jäykistyslevyn kiinnityksessä käytettävän liittimen siirtymäkerroin (RIL 205-1-2017)
K_T	Materiaalin käsittelykerroin (Wood Design Manual 2015)
k	Jäykistyslevyn lommahduskerroin (RIL 205-1-2017)
k_1	Apukeroin jäykistyslevyn lommahduskertoimen määrittämiseen (RIL 205-1-2017)
k_2	Apukeroin jäykistyslevyn lommahduskertoimen määrittämiseen (RIL 205-1-2017)
k_{crit}	Mitan a pituisena ulokepalkkina toimivan levyn kiepahduskerroin (RIL 205-1-2017)
L	Jäykistystason jänneväli (SDPWS 2015, Wood Design Manual 2015, Leskelä 2005)
L	Palkin jänneväli (Salmi & Pajunen 2010)
L_D	Jäykistystason leveys (Wood Design Manual 2015)
l	Jäykistystason jänneväli (EN 1995-1-1, Design of timber structures Volume 1)
M	Jäykistystason taivutusmomentin maksimiarvo (Design of timber structures Volume 1)
$M(z)$	Jäykistystason taivutusmomentti tarkastelupisteessä z (Leskelä 2005)
M_d	Jäykistystasossa vaikuttava taivutusmomentti murtorajatilassa (EN 1995-1-1)

M_f	Jäykistystasossa vaikuttavan taivutusmomentin maksimiarvo (Wood Design Manual 2015)
M_k	Jäykistystason taivutusmomentin maksimiarvo käyttörajatilassa
M_{max}	Jäykistystason taivutusmomentin maksimiarvo (Leskelä 2005)
m	Puolet levykentän pituussuunnassa olevien levyjen lukumäärästä (Leskelä 2005)
$maxM_d$	Suurin tasossa vaikuttava taivutusmomentti murtorajatilassa (RIL 205-1-2017)
$N_c(z)$	Reunapalkin tarkastelupisteessä z vaikuttava puristusvoima (Leskelä 2005)
$N_{c,Ed}$	Reunapalkissa vaikuttava puristusvoima murtorajatilassa (RIL 205-1-2017)
N_d	Reunapalkissa vaikuttava normaalivoima murtorajatilassa (EN 1995-1-1)
$N_{t,Ed}$	Reunapalkissa vaikuttava vetovoima murtorajatilassa (RIL 205-1-2017)
N_u	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen leikkauskestävyys (Wood Design Manual 2015)
N_{max}	Reunapalkin normaalivoiman maksimiarvo (Leskelä 2005)
$N_t(z)$	Reunapalkin tarkastelupisteessä z vaikuttava vetovoima (Leskelä 2005)
n	Levykentän leveyssuunnassa olevien levyjen lukumäärä (Leskelä 2005)
n_u	Jäykistystason kiinnitysliittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo standardin CSA 086 mukaan (Wood Design Manual 2015)
P_f	Reunapalkissa vaikuttavan puristusvoiman maksimiarvo (Wood Design Manual 2015)
Q	Jäykistystason päädyssä vaikuttava leikkausvoima murtorajatilassa (EN 1995-1-1)
Q_y	Poikkileikkausta kuormittava leikkausvoima (Salmi & Pajunen 2010)
Q_{mean}	Tasossa vaikuttava keskimääräinen leikkausvoima (RIL 205-1-2017)
q	Jäykistystason tasaisen kuorman suuruus murtorajatilassa (EN 1995-1-1)
q_0	Rakenteen tasainen kuorma käyttörajatilassa (Salmi & Pajunen 2010)
q_w	Tuulikuorma (Leskelä 2005)
R	Jäykistystason leikkausvoimakestävyys (EN 1995-1-1)
R_i	Jäykistystason päädyssä yksittäiseen liitimeen vaikuttava leikkausvoima (EN 1995-1-1)
R_v	Jäykistyslevyn kiinnityksessä käytettävän yksittäisen liittimen leikkauskestävyyden mitoitusarvo (EN 1995-1-1)
$S_z(\bar{y})$	Kohdan \bar{y} sekä poikkipinnan alareunan rajaaman alueen staattinen momentti z -akselin suhteen (Salmi & Pajunen 2010)
s	Jäykistyslevyn kiinnityksessä käytettävä liitinjako (EN 1995-1-1, Design of timber structures Volume 1, Wood Design Manual 2015)
s_i	Levyn kiinnityksessä käytettävä liitinjako (RIL 205-1-2017)
T	Reunapalkissa vaikuttava vetovoima (Design of timber structures Volume 1)

T_f	Reunapalkissa vaikuttavan vetovoiman maksimiarvo (Wood Design Manual 2015)
t	Jäykistyslevyn paksuus (Design of timber structures Volume 1, Wood Design Manual 2015, Leskelä 2005)
t_i	Jäykistyslevyn paksuus (RIL 205-1-2017)
U	Jäykistyslevyn potentiaalienergia (Leskelä 2005)
U_1	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimien siirtymästä aiheutuva sisäinen energia (Leskelä 2005)
U_2	Jäykistyslevyn yläreunan siirtymästä aiheutuva ulkoinen energia (Leskelä 2005)
U_3	Jäykistyslevyn leikkausmuodonmuutoksesta aiheutuva sisäinen energia (Leskelä 2005)
U_4	Jäykistyslevyn leikkausvoimasta aiheutuvasta yläreunan siirtymästä aiheutuva ulkoinen energia (Leskelä 2005)
u	Jäykistyslevyn yläreunan siirtymä (Leskelä 2005)
u	Jäykistystason siirtymä (Leskelä 2005)
u_x	Jäykistyslevyn nurkassa olevan kiinnitysliittimen siirtymä vaakasuunnassa (Leskelä 2005)
u_{xi}	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen siirtymä vaakasuunnassa (Leskelä 2005)
u_y	Jäykistyslevyn nurkassa olevan kiinnitysliittimen siirtymä pystysuunnassa (Leskelä 2005)
u_{yi}	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen siirtymä pystysuunnassa (Leskelä 2005)
V	Jäykistystason päädyssä vaikuttava leikkausvoima (Design of timber structures Volume 1)
$V(z)$	Jäykistystason leikkausvoima tarkastelupisteessä z (Leskelä 2005)
V_d	Jäykistystason levytyksen leikkauskestävyys pituusyksikköä kohden (Wood Design Manual 2015)
V_{max}	Jäykistystason leikkausvoiman maksimiarvo (Leskelä 2005)
V_{mean}	Jäykistystason keskimääräinen leikkausvoima (Leskelä 2005)
V_{pb}	Jäykistystason lommahduskestävyyden ominaisarvo pituusyksikköä kohden (Wood Design Manual 2015)
V_{rd}	Jäykistystason leikkauskestävyys pituusyksikköä kohden (Wood Design Manual 2015)
V_{rd}	Jäykistystason lommahduskestävyys pituusyksikköä kohden (Wood Design Manual 2015)
v	Jäykistystason päädyssä vaikuttava leikkausvoima pituusyksikköä kohden murtorajatilassa (EN 1995-1-1, Design of timber structures Volume 1)
v	Jäykistystason suurin leikkausvoima pituusyksikköä kohden (SDPWS 2015)
v_{max}	Palkin taipuman maksimiarvo (Salmi & Pajunen 2010)
v_w	Leikkauskestävyyden ominaisarvo (SDPWS 2015)
W	Jäykistystason leveys (SDPWS 2015)
w	Jäykistystason tasaisen kuorman suuruus (Design of timber structures Volume 1, Leskelä 2005)
w_0	Perustustasossa vaikuttava tasainen kuorma (Leskelä 2005)
w_l	Yläpohjan jäykistystason tasainen kuorma (Leskelä 2005)
w_i	Välipohjan jäykistystason tasainen kuorma (Leskelä 2005)

X	Reunapalkin liitoksen ja lähimmän tukilinjan välinen etäisyys (2015 International Building Code 2014)
x	Reunapalkin liitoksen ja lähimmän tukilinjan välinen etäisyys (SDPWS 2015, Wood Design Manual 2015)
x_i	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen sijainnin x-komponentti (Leskelä 2005)
x_{max}	Jäykistyslevyn nurkassa olevan kiinnitysliittimen x-koordinaatti (Leskelä 2005)
y	Tarkastelupisteen etäisyys poikkileikkauksen neutraaliakselista (Salmi & Pajunen 2010)
y_i	Jäykistyslevyn kiinnitysliittimen sijainnin y-komponentti (Leskelä 2005)
y_{max}	Jäykistyslevyn nurkassa olevan kiinnitysliittimen y-koordinaatti (Leskelä 2005)
z	Jäykistystason tarkastelupisteen koordinaatti (Leskelä 2005)
Δ_{ADVE}	Pystysuuntaisten jäykistysrakenteiden siirtymä (ASCE/SEI 7-16)
Δ_c	Reunapalkin jatkoksen liukuma tähän vaikuttavalla leikkausvoimalla (SDPWS 2015, Wood Design Manual 2015)
Δ_d	Jäykistystason taipuma tason jännevälin keskellä (Wood Design Manual 2015)
α	Apukerroin (Wood Design Manual 2015)
α	Jäykistyslevyn kiinnitystapakerroin (Leskelä 2005)
β	Jäykistyslevyn kiinnitystapakerroin (Leskelä 2005)
β_i	Jäykistyslevyn kiinnitystapakerroin (RIL 205-1-2017)
γ	Jäykistyslevyn leikkausmuodonmuutoskulma (Leskelä 2005)
γ_i	Jäykistyslevyn kiinnitystapakerroin (RIL 205-1-2017)
δ_{dia}	Jäykistystason taipuma (SDPWS 2015)
δ_{MDD}	Jäykistystason taipuma (ASCE/SEI 7-16)
η	Apukerroin (Wood Design Manual 2015)
$\sigma_{b,i}$	Jäykistyslevyn taivutusjännitys y-akselin suhteen (RIL 205-1-2017)
τ	Jäykistyslevyissä vaikuttavan leikkausjännitys (Design of timber structures Volume 1)
$\tau_{d,i}$	Jäykistyslevyissä vaikuttavan leikkausjännityksen huippuarvo (RIL 205-1-2017)
τ_{xy}	Suorakulmiopoikkileikkauksessa vaikuttava leikkausjännitys (Salmi & Pajunen 2010)
$\tau_{xy}(\bar{y})$	Leikkauskäyrällä vaikuttava jännitys (Salmi & Pajunen 2010)
φ	Lujuuskerroin (Wood Design Manual 2015)
ω	Rakennuksen kokonaisvaakasiirtymä tarkastelupisteessä
$\omega_{i,v}$	Leikkausvoimasta aiheutuva yksittäisen levyn siirtymä (RIL 205-1-2017)
ω_m	Jäykistystason taivutusmomentista aiheutuva siirtymä tason jännevälin keskellä (RIL 205-1-2017)
ω_{mean}	Jäykistystason leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä tason jännevälin keskellä (RIL 205-1-2017)
$\omega_{i,n}$	Jäykistyslevyjonon leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä (RIL 205-1-2017)
ω_{tot}	Jäykistystason kokonaisvaakasiirtymä tason jännevälin keskellä

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennuksen kokonaisjäykistys on rakennesuunnittelun tärkeimpiä osa-alueita. Puurunkoisten rakennuksien jäykistysjärjestelmä koostuu yleensä jäykistysseinistä ja vaakasuuntaisista jäykistystasoista, joiden kautta rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat vietään perustuksille. Vaakakuormat muodostuvat tuuli-, maanjäristys- ja törmäyskuormista, sekä mahdollisten nostureiden jarruvoimista. Lisäksi jäykistysrakenteita kuormittavat rakenteiden vinoudesta ja pystykuormien epäkeskisyydestä aiheutuvat lisävaakavoimat. Tavallisesti jäykistysrakennelmissä hyödynnetään rakennuslevyjä, joiden jäykistyskapasiteetti on merkittävässä roolissa rakenteen toimintaa tarkasteltaessa.

Rakennuslevyillä jäykistettyjen puurunkoisten väli- ja yläpohjarakenteiden nykyiset Suomessa käytössä olevat suunnitteluohjeet ovat yksipuoliset ja vaikeaselkoiset, mikä antaa aiheen arvioida näiden kelpoisuutta. Ohjeet eivät huomioi puurunkoisen jäykistystason erilaisia rakennemalleja, vaan olettavat tasojen toimintatavan joustavaksi palkiksi. Lisäksi ohjeet huomioivat levyjen erilaiset kiinnitystavat rajoittuneesti, eivätkä ota riittävästi kantaa tason yksityiskohtien suunnitteluun. Puutteet johtavat levyjäykistysrakenteiden epätarkkaan suunnitteluun ja vaikeuttavat näiden kustannustehokasta toteuttamista.

Suunnitteluohjeiden puutteiden vuoksi on tarkoitus aloittaa tutkimusprojekti, jonka tavoitteena on laatia monipuolinen, helppokäyttöinen ja tarkka suunnitteluohje rakennuslevyillä jäykistetyille puurunkoisille väli- ja yläpohjarakenteille. Tämä diplomityö on osa projektin käynnistysvaihetta. Projektin osapuolina ovat diplomityön tekovaiheessa Tampereen Teknillinen Yliopisto (TTY), Saint-Gobain Finland Oy ja DOF-Tech Oy. Projektin vastuullisena vetäjänä toimii Tampereen Teknillinen Yliopisto (Associate Prof. Sami Pajunen). Tutkimusprojektin lopputuloksena olevan suunnitteluohjeen toiminta on tarkoitus todentaa projektin loppuvaiheessa kuormituskokeilla.

1.2 Diplomityön tavoitteet ja sisältö

Tämän diplomityön tavoitteena on muodostaa lähtökohdat tutkimusprojektin toteutukseen. Työssä kootaan yhteen nykyiset olemassa olevat suunnitteluohjeet ja verrataan näitä uuteen mitoitusteoriaan, joka on esitetty lähteessä (Leskelä 2005). Kirjallisuuskatsauksen perusteella arvioidaan Suomessa käytössä olevien suunnitteluohjeiden kelpoisuutta. Suunnitteluohjeiden ongelmakohdat määritetään ja avataan erityispiirteineen. Näiden perusteella esitetään puutteiden korjaamiseksi vaadittavat lisätutkimukset, joiden mukaan

tulevan tutkimusprojektin sisältö määräytyy. Lisäksi tehdään suunnitteluohjeiden laskennallinen vertailu kahdella konkreettisella tasorakenteella, jolla selvennetään menetelmien eroja. Diplomityön ulkopuolelle rajataan uuden suunnitteluohjeen laadinta, sekä tämän kehittämisprosessissa vaadittavien koekuormitusjärjestelyiden suunnittelu.

Työn luvussa 2 käsitellään alaotsikoiden mukaisia olemassa olevia suunnitteluohjeita, sekä niiden taustoja. Tarkasteluun on valittu sekä Suomessa käytössä olevat suunnitteluohjeet että kansainvälisesti käytössä olevia keskeisimpiä ohjeita. Luvussa avataan lähteiden sisältämät levyjäykistystasojen teoriataustat, laskentamenetelmät ja havaitut puutteet.

Kolmas luku sisältää Leskelän kehittämän uuden levyjäykistyksen suunnitteluohjeen esittelyn. Suunnitteluohje avataan yksityiskohtaisesti ja tätä verrataan luvussa 2 esitettyihin ohjeisiin. Lisäksi esitetään suunnitteluohjeiden laskennallisen vertailun lähtökohdat ja tulokset. Vertailun perusteella todetaan menetelmän puutteet, joiden mukaan tämän toimivuutta ja riittävyyttä lopulliseksi suunnitteluohjeeksi arvioidaan.

Luvussa 4 esitetään uuden suunnitteluohjeen kehitysprosessi. Kehitysprosessin tavoitteet ja tarvittava sisältö esitetään. Lisätutkimustarpeet määritetään diplomityössä havaittujen ongelmakohtien perusteella, jotka avataan erityispiirteineen. Ongelmakohtiin esitetään tutkimuksen toteuttamisessa tarvittavat lähtökohdat, sekä alustavat tutkimusmenetelmät.

Viides luku sisältää diplomityön johtopäätökset. Kehitysprosessin tuloksena olevan parannetun levyjäykistystasojen suunnitteluohjeen tarvittava sisältö esitetään. Loppuyhteenvedossa avataan työn sisältö ja tuloksena olevat lisätutkimustarpeet. Näiden perusteella arvioidaan diplomityön tavoitteiden saavuttamista.

2. OLEMASSA OLEVAT SUUNNITTELUOHJEET

2.1 EN 1995-1-1, Eurooppa

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, jotka on laatinut euroopalainen standardisointijärjestö CEN Euroopan komission toimeksiannosta. Standardit ohjaavat ja määräävät suunnittelua, päämääränään varmistaa rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden täyttävän neuvoston direktiivin 89/106/ETY vaatimukset. Erityisen olennaisia vaatimuksia ovat rakenteiden mekaaninen lujuus ja vakavuus, sekä paloturvallisuus. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC)

Suomessa eurokoodisuunnittelustandardien käyttö rakentamismääräyskokoelman rinnalla aloitettiin 1.11.2007, jolloin talonrakennuksen suunnittelussa käytettävät keskeiset eurokoodiosat julkaistiin suomeksi, sekä niihin liittyvät kansalliset liitteet vahvistettiin. Eurokoodit korvasivat rakentamismääräyskokoelman B-osat 1.9.2014, jonka jälkeen eurokoodisuunnittelustandardeja kansallisine liitteineen on tullut käyttää rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa. (Eurokoodi help desk 2018)

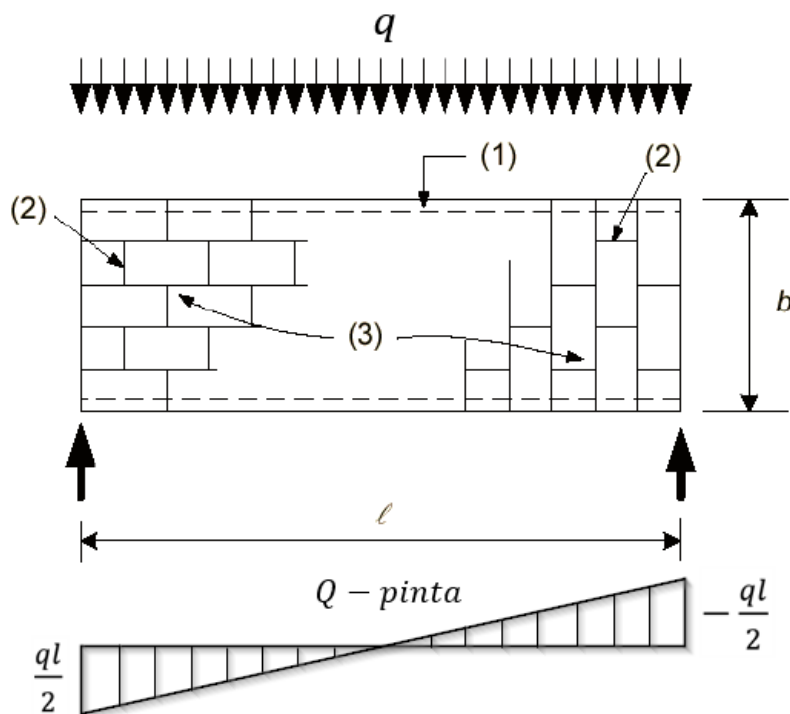
Eurokoodeja on tällä hetkellä 58 osaa, jotka sisältävät yleiset suunnitteluperusteet, rakenteiden kuormien määrittämisperiaatteet ja omat osat eri rakennusmateriaalien suunnitteluun. Kansalliseksi standardiksi vahvistaminen edellyttää, että CENin julkaisema eurokoodin teksti sisällytetään tähän täydellisenä, mahdolliset kansalliset liitteet mukaan luettuina. Kansalliset liitteet voivat sisältää tietoa vain niistä parametreista, jotka on jätetty eurokoodissa auki kansallista valintaa varten ja joita käytetään kyseisessä maassa toteutettavassa suunnittelussa. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC)

Standardissa SFS-EN 1995-1-1 esitetään puurakenteiden varmuutta, käyttökelpoisuutta ja säilyvyyttä koskevat periaatteet ja vaatimukset. Standardi perustuu rajatilamenetelmään ja sen yhteydessä käytettävään osavarmuuslukumenettelyyn. Uusien rakenteiden suunnittelussa standardi EN 1995 on tarkoitettu käytettäväksi suoraan yhdessä standardin EN 1990:2002 sekä standardin EN 1991 asianomaisten osien kanssa. Standardin SFS-EN 1995-1-1 kansallisessa liitteessä esitetään vaihtoehtoisia menettelytapoja, arvoja ja luokitussuosituksia, joiden yhteydessä mainitaan, missä kansallisia valintoja voidaan tehdä. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC, s.10)

Standardin luku 9.2.3 sisältää vesikattojen ja välipohjien levyjäykistystasoja koskevan ohjeistuksen. Luku sisältää mitoitusperusteita laskentamenetelmään, mutta määrittäisperiaatteita jäykistysrakenteita kuormittaville voimasuureille ei anneta. Vaakasuntaiset jäykistystasot rajataan vapaasti tuettuihin rakenteisiin, jotka kootaan puulevyistä ja kiinnitetään metalliliittimin puurunkoon. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC, 9.2.3.1(1)) Standar-

din mukaan levyjen reunoilla olevien liittimien kestävyysarvot voidaan suurentaa kertomalla standardin luvussa 8 esitetyt arvot kertoimella 1,2. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC, 9.2.3.1(2))

Tasaisesti kuormitetuille jäykistystasojille on esitetty yksinkertaistettu analyysi luvussa 9.2.3.2. Kuvassa 1 on esitetty tarkasteltavan tason kuormitus, rakenneosat ja leikkausvoimakuvio. Kuvassa on eritelty reunapalkit (1), epäjatkovat levyjen reunat (2) ja levyjen limitykset (3).



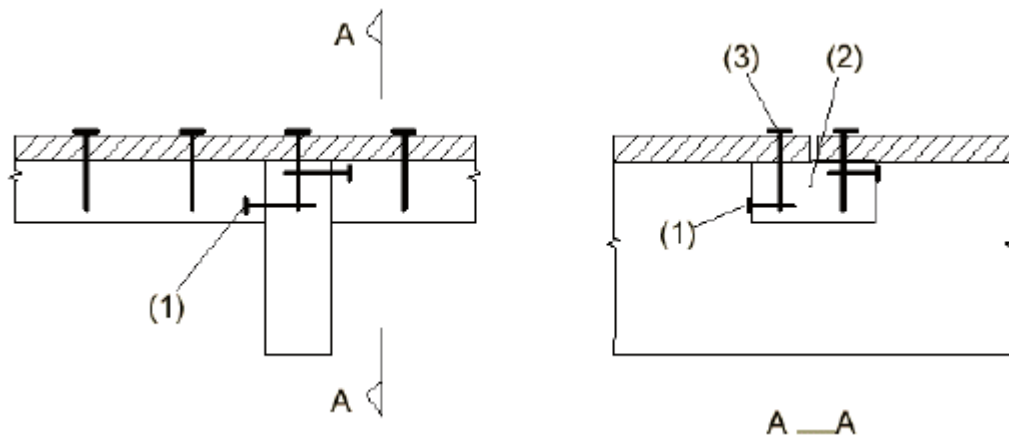
Kuva 1. Vaakasuuntaisen levyjäykistystason rakennemalli ja leikkausvoimakuvio (SFS-EN-1995-1-1, kuva 9.4, muokattu)

Yksinkertaistetun analyysin käyttö edellyttää, että rakenne toteuttaa standardin mukaiset reunaehdot. Tason jänneväli l on rajoitettu leveyden b suhteen

$$l = 2b \dots 6b. \quad (1)$$

Tason muotosuhteiden rajoituksella on pyritty varmistamaan tämän toiminta joustavana palkkina. Standardi ei ota kantaa tasotapauksiin, joiden muotosuhteet eivät ole yhtälön 1 mukaiset. Tällöin esimerkiksi neliön muotoisen tason suunnittelu ei ole esitetyllä menetelmällä mahdollista. Muotosuhteiden lisäksi mitoituksen kriittinen murtorajatila tulee olla liittimien (ei levyjen) pettäminen ja levyjen kiinnitystapa standardin kohdan 10.8.1 mukainen. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC, s.87)

Yksinkertaistettu analyysi olettaa, että katelevyt, jotka eivät ole sekundaaripalkkien tai kattotuolien tukemia, kiinnitetään toisiinsa esim. ruoteiden avulla. Tällöin kiinnityслиittimet sijaitsevat levyn kaikilla reunoilla (suljettu kiinnitystapa). Kuvassa 2 on esitetty kohdan 10.8.1 mukainen esimerkki levyjen epäjatkuvan reunan kiinnityksestä. Epäjatkuva reuna havaitaan leikkauksessa A-A. Kuvassa on esitetty apuruoteen vinonaulaus/-ruuvaus sekundaaripalkkiin tai kattotuoliin (1), apuruode (2) ja apuruoteeseen naulattu katelevy (3).



Kuva 2. Levyjen epäjatkuvan reunan kiinnitys (SFS-EN 1995-1-1, kuva 10.1)

Liittiminä tulee käyttää standardin EN 14592 mukaisia nauloja (sileitä nauloja lukuun ottamatta) tai ruuveja siten, että suurin sallittu liitinväli pitkin katelevyjen reunoja on 150 mm. Levyn muilla kiinnityslinjoilla suurin sallittu liitinväli on 300 mm. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC, s.98)

Standardissa todetaan, että ellei yksityiskohtaisempaa analyysiä suoriteta, tulee tason reunapalkit suunnitella kestävänsä tasossa vaikuttava suurin taivutusmomentti. Tällöin oletetaan, että levykenttä ei ota vastaan normaalijännitystä, vaan tämä jakautuu kokonaan reunapalkeille. Reunapalkeissa vaikuttavat normaalivoimat muodostavat voimaparin, jonka momentti on tasossa suurin vaikuttava taivutusmomentti. Normaalivoiman suuruus N_d määritetään tällöin tasossa vaikuttavasta taivutusmomentista M_d ja reunapalkkien, eli voimien, välisestä etäisyydestä b kaavalla

$$N_d = M_d / b. \quad (2)$$

Tason leikkauskestävyys voidaan johtaa standardin reunaehdosta, jonka mukaan tason mitoittavana tekijänä tulee olla liitinten kestävyys. Yksiaukkoisen tason päädyissä vaikuttaa suurin leikkausvoima (kuva 1), jonka mukaan tason kestävyys määritetään. Leikkausvoiman suuruus Q määritetään kaavalla

$$Q = \frac{ql}{2} \quad (3)$$

missä q on tason tasaisen kuorman suuruus murtorajatilassa. Leikkausvoiman oletetaan olevan tarkastelupisteen poikkileikkauksessa vakio tason leveyssuunnassa. Tällöin päädyssä vaikuttava leikkausvoima pituusyksikköä kohden v määritetään kaavalla

$$v = \frac{Q}{b} = \frac{ql}{2b}. \quad (4)$$

Yksittäiseen kiinnitysliittimeen vaikuttaa liittimien jakovälin s pituinen osuus päädyn leikkausvoimasta. Voiman suuruus R_i määritetään kaavalla

$$R_i = vs = \frac{qls}{2b}. \quad (5)$$

Kun yksittäisessä liittimessä vaikuttavaksi voimaksi määritetään tämän kestävyys R_v , määritetään tason leikkausvoimakestävyys R kaavalla

$$R = q = \frac{R_v 2b}{ls}. \quad (6)$$

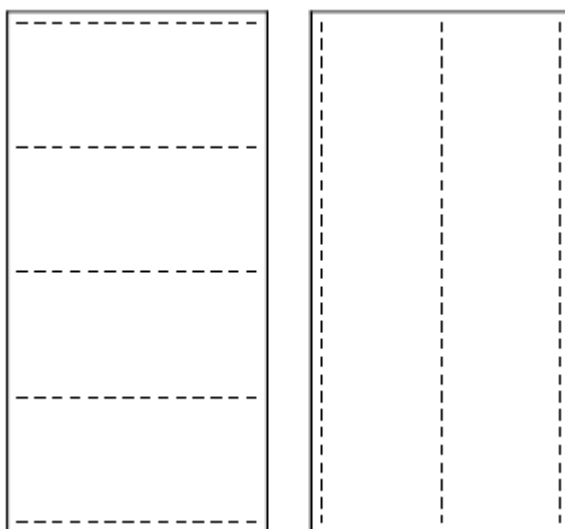
Mikäli levyt limitetään kuvan 1 mukaan, voidaan epäjatkuvilla levyjen reunoilla olevia naulavälejä suurentaa kertomalla ne luvulla 1,5 (enintään mittaan 150 mm) kestävyyttä pienentämättä. (SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC, s.88)

Eurokoodin vaakasuuntaisia jäykistystasoja koskeva osa on lyhyt ja puutteellinen käytännön mitoitus työn kannalta. Standardi ei ota kantaa suunnittelussa käytettävään tason rakennemalliin, vaan olettaa tason toimivan joustavana palkkina. Rakennemallivalinta vaikuttaa merkittävästi rakennuksen pystysuuntaisten jäykistysrakenteiden voimasuureisiin. Mahdollisiin jäykistäviin väliseiniin ja tason jatkuvuuteen näiden kohdalla ei myöskään oteta kantaa. Lisäksi ongelmana ovat yksinkertaistetun laskentamenetelmän ja todellisten levyjen kiinnitystapojen merkittävät eroavaisuudet. Laskentamenetelmä olettaa, että jokainen yksittäinen levy on kiinnitetty jokaiselta reunaltaan (suljettu kiinnitystapa), eikä huomioi mahdollisia levyn keskellä olevia kiinnityksiä. Liittimien oletetaan käyttäytyvän täysin plastisesti leikkauksessa, mikä voi johtaa rajoittamattomiin muodonmuutoksiin. (Leskelä 2005, s. 3) Oletukset rajoittavat laskentamenetelmän käyttökelpoisuutta, sillä todellisuudessa levyt kiinnitetään usein vain joko levyn pituus- tai leveyssuunnassa. (Leskelä 2005, s. 4) Kuvassa 3 on esitetty eurokoodin yksinkertaistetussa analyysissä oletettu yksittäisen levyn kiinnitystapa.



Kuva 3. Eurokoodin mukainen levyn kiinnitystapa (Leskelä 2005, kuva 2.2)

Todellisuudessa levyt kiinnitetään tavallisesti kannattajien alapintaan kiinnitettyyn puurunkoon, jonka k-jako on 300...600 mm. Rungon k-jako määrittää levyjen kiinnityслиittimien sijainnin, eikä levyjen tukemattomissa päädyissä tavallisesti käytetä kuvan 2 mukaisia apuruoteita. Apuruoteiden asennus lisää työvaiheita työmaalla, minkä vuoksi levyjen epäjatkovien päiden välillä on usein vain pontti- tai puskuliitos, levytyypistä riippuen. Kuvassa 4 on esitetty levyjen tyypilliset kiinnitystavat.



Kuva 4. Levyjen tyypilliset kiinnitystavat (Leskelä 2005, kuva 2.3)

Standardi ei anna laskennallista menetelmää levyjen limityksen vaikutuksen määrittämiseen. Limityksen antama lisäjäykistyskapasiteetti huomioidaan ainoastaan kertoimella 1,5, jota voidaan käyttää levyjen epäjatkovien reunojen kiinnikevälien suurentamiseen. Todellisissa kuvan 4 tilanteissa epäjatkovilla reunoilla ei käytetä kiinnikkeitä, minkä vuoksi limityksen vaikutus jää mitoituksessa hyödyntämättä. Mahdollisten päällekkäisten

levykerroksien ja näiden kiinnikkeiden vaikutusta ei huomioida mitenkään. Tällöin esimerkiksi kentän ulommaiseksi levykerrokseksi asennettavan palokipsilevyn jäykistyskapasiteettillisää ei hyödynnetä.

Tason reunapalkit määrätään mitoittaviksi kentän suurimman taivutusmomentin mukaan, mutta muuten standardi ei ota kantaa kentän liittyviin rakenteisiin, tai näiden väliin liitoksiin. Yksityiskohtien, kuten tason aukotuksien vaikutukset jätetään myös huomioimatta. Lisäksi jäykistysrakenteen vaakasiirtymää ei määritetä, mihin on syynä oletus liittimien plastisesta käyttäytymisestä. (Leskelä 2005, s. 3)

2.2 RIL 205-1-2017, Suomi

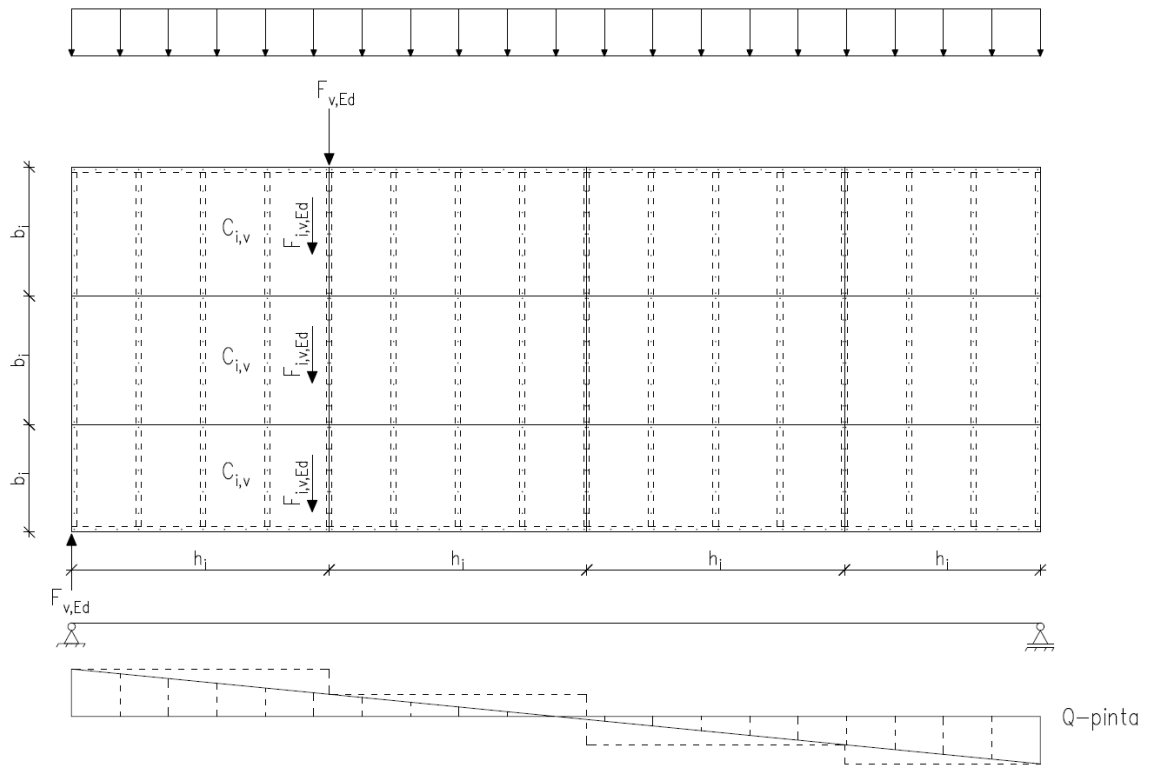
Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry julkaisee ammattikirjallisuutta, jonka tavoitteena on luoda edellytykset jäsenkunnan, rakennusalan asiantuntijoiden ja opiskelijoiden ammattitaidon kehittämiseen ja ylläpitämiseen. (RIL julkaisut 2018) RIL julkaisi ensimmäiset Eurokoodi 5:n esistandardiin ENV 1995-1-1 perustuvat kantavien puurakenteiden suunnitteluohjeet vuosina 1997 ja 2003 (RIL 205-1997 ja RIL 205-2003). Tarkoituksena oli saattaa eurooppalainen suunnittelujärjestelmä suomalaisten asiantuntijoiden käyttöön käyttäjäystävällisessä ja tiiviissä muodossa. Vuonna 2007 julkaistiin RIL 205-2007 Puurakenteiden suunnitteluohje, joka oli jaettu kahteen osaan Eurokoodistandardien mukaisesti. Ensimmäinen osa RIL 205-1-2007 perustui standardiin SFS-EN 1995-1-1, joka käsittelee puurakenteiden yleisiä sääntöjä. Toinen osa RIL 205-2-2007 perustui standardiin SFS-EN 1995-1-2, joka käsittelee puurakenteiden palomitoitusta. Suunnitteluohjeita on päivitetty ajan mittaan tarvittavin osin, tuoreimmat versiot julkaisuista ovat RIL 205-1-2017 ja RIL 205-2-2009. (RIL 205-1-2017)

Julkaisu RIL 205-1-2017 sisältää puurakenteiden suunnittelun yleiset säännöt ja suunnitteluperusteet eri rakenneosille, huomioiden vuonna 2017 voimaan astuneen uuden rakennusmääräyskokoelman osan Rakenteiden lujuus ja vakaus. (Ympäristöministeriö 2018) Suunnitteluohje antaa tiivistetyssä muodossa ohjeita puurakenteiden syvälliseen suunnitteluun eurokoodeihin ja kansallisiin valintoihin ja määräyksiin perustuen. Lisäksi ohjeessa on tarpeellisia lisäyksiä, jotka täydentävät eurokoodin mukaista suunnittelua. (RIL 205-1-2017)

Suunnitteluohjeen sisältö noudattaa standardin SFS-EN 1995-1-1 mukaista sisällystä. Luvussa 9 on käsitelty koottuja rakenneosia, levykenttiä ja jäykistystä. Kohdassa 9.2.3.2 esitetään eurokoodin mukainen yksinkertaistettu analyysi kattojen ja välipohjien jäykistystasojille, jonka sisältö ja puutteet on esitetty tämän työn luvussa 2.1. Lisäohjeena on annettu kohdassa 9.2.4.3S levyjäykisteen yleinen mitoitusmenetelmä, jota käytetään eurokoodin mukaisen yksinkertaistetun analyysin vaihtoehtona.

Yleisessä mitoitusmenetelmässä levyjäykistystason levyjen, reunapalkkien ja liittimien kestävyys määritetään murtorajatilassa ja siirtymät käyttörajatilassa. Ohje määrää, että

levykentän mitoittavana tekijänä tulee olla liitinten kestävyys, ei levyjen pettäminen. Tästä syystä mitoitusprosessissa tarkistetaan, että levyssä vaikuttava leikkausjännitys ei ylitä levyn paneelileikkauslujuutta, eikä lommahdusta tapahdu. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki suunnitteluohjeen mukaisen levyjäykistystason rakennemallista. (RIL 205-1-2017)



Kuva 5. Yleisen mitoitusmenetelmän levyjäykistystason rakennemalli ja leikkausvoimakuvio (RIL 205-1-2017, kuva 9.14aS, muokattu)

Mitoitusmenetelmä perustuu yksittäisten levyjen jäykkyyksiin, joissa huomioidaan levyjen ja kiinnikkeiden ominaisuudet, sekä levyjen kiinnitystapa liitteen 1 taulukon kiinnitystapakertoimilla. Yksittäisen levyn jäykkyyserroin $C_{i,v}$ määritetään kaavalla

$$C_{i,v} = \frac{1}{\beta_i \frac{s_i h_i^2}{K_{ser,i} b_i^3} + \frac{h_i}{b_i G_{mean,i} t_i}}, \quad (7)$$

missä

- β_i on kiinnitystapakeroitin liitteen 1 taulukosta
- s_i on liitinjako (liittimien välinen etäisyys)
- h_i on levyn korkeus
- b_i on levyn leveys
- t_i on levyn paksuus
- $G_{mean,i}$ on levyn liukumoduuli (paneelileikkaus)

$K_{ser,i}$ on liittimen siirtymäkerroin. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.1S)

Ohje antaa kiinnitystapakertoimet kahdeksalle erilaiselle kiinnitystavalle, jotka eroavat toisistaan levyn kiinnitysrungon suunnan ja k-jaon suhteen. Kiinnitysrungon k-jaot on sidottu kaikissa kiinnitystavoissa levyn mittoihin, sillä runkopuiden välisille etäisyyksille ei ole annettu mittoja, vaan ainoastaan lukumäärät. Valittu kiinnitystapa määrittää käytettävän kaavan β -kertoimelle, joka on dimensioton suure. Kiinnitystapakertoimet on johdettu yksittäisen jäykistyslevyn leikkausvoimajakaumasta, leikkausmuodonmuutoksesta ja siirtymästä. Kertoimien johtamisperiaate on esitetty lähteessä (Leskelä 1994).

Levyjäykistystasoa tarkastellaan vierekkäisinä kuormituksen suuntaisina levyjonoina, joissa jonoon vaikuttava voima jakautuu yksittäisille levyille näiden jäykkyyskertoimien suhteessa. Yksittäistä levyä kuormittava vaakavoima $F_{i,v,Ed}$ määritetään kaavalla

$$F_{i,v,Ed} = \frac{C_{i,v}}{\sum C_{i,v}} F_{v,Ed}, \quad (8)$$

missä $\sum C_{i,v}$ on levyjonossa olevien levyjen jäykkyyskertoimien summa, ja $F_{v,Ed}$ on levyjonoa kuormittava vaakavoima murtorajatilassa. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.2S)

Levyn ja rungon välisen liitoksen leikkausvoimakestävyys tulee olla vähintään levyä kuormittavan voiman suuruinen. Kun taso oletetaan yksiaukkoiseksi palkiksi, vaikuttavat tason reunimmaisiiin levyjonoihin suurimmat leikkausvoimat. Tällöin näissä jonoissa olevat levyt mitoittavat liitoksien leikkausvoimakestävyiden. Leikkausvoimakestävyys $F_{i,v,Rd}$ määritetään kaavalla

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd,i} b_i}{\gamma_i s_i}, \quad (9)$$

missä $F_{f,Rd,i}$ on levyn liittimen leikkausvoimakestävyiden mitoitusarvo, ja γ_i on kiinnitystapakerroin liitteen 1 taulukosta. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.3S) β -kertoimen tapaan myös γ -kertoimen kaavan valintaperuste ja muuttujat perustuvat lähteeseen (Leskelä 1994).

Yksittäisen levyn leikkaus- ja lommahdustarkastelussa levyssä vaikuttavan leikkausjännityksen $\tau_{d,i}$ tulee täyttää ehto

$$\tau_{d,i} = \frac{1,5 F_{i,v,Ed}}{b_i t_i} \leq \min(f_{v,crit,i}, f_{v,d,i}), \quad (10)$$

missä $f_{v,crit,i}$ on levyn kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen, ja $f_{v,d,i}$ on levyn paneelileikkauslujuuden mitoitusarvo. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.9S) Yhtälössä 10 huomioidaan leikkausjännityksen todellinen jakaantuminen poikkileikkauksessa. Leikkauskäyrällä vaikuttavan jännityksen $\tau_{xy}(\bar{y})$ määrittämisessä hyödynnetään Jourawskin kaavaa

$$\tau_{xy}(\bar{y}) = \frac{Q_y S_z(\bar{y})}{I_z b(\bar{y})}, \quad (11)$$

missä

Q_y on poikkileikkausta kuormittava leikkausvoima

$S_z(\bar{y})$ on kohdan \bar{y} sekä poikkipinnan alareunan rajaaman alueen staattinen momentti z-akselin suhteen

I_z on poikkileikkauksen neliömomentti

$b(\bar{y})$ on poikkileikkauksen leveys kohdalla \bar{y} . (Salmi & Pajunen 2010, s. 195)

Kun Jourawskin kaavaa sovelletaan suorakulmiopoikkileikkaukselle, määritetään leikkausjännitys kaavalla

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Q_y b \left[\left(\frac{1}{2}h \right)^2 - y^2 \right]}{2 \frac{1}{12} b h^3 b} = \frac{3Q_y}{2bh} \left[1 - \left(\frac{y}{\frac{1}{2}h} \right)^2 \right], \quad (12)$$

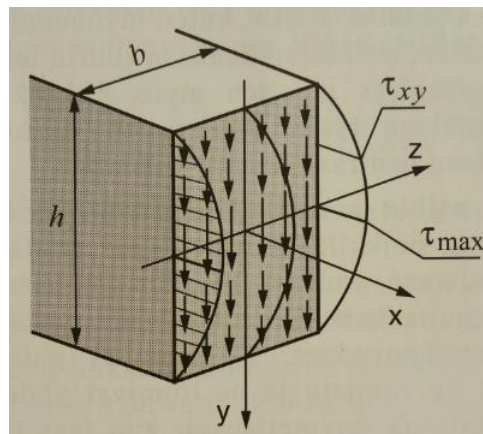
missä

b on poikkileikkauksen leveys (kuva 6)

h on poikkileikkauksen korkeus (kuva 6)

y on tarkastelupisteen etäisyys poikkileikkauksen neutraaliakselista (kuva 6). (Salmi & Pajunen 2010, kaava 196.1)

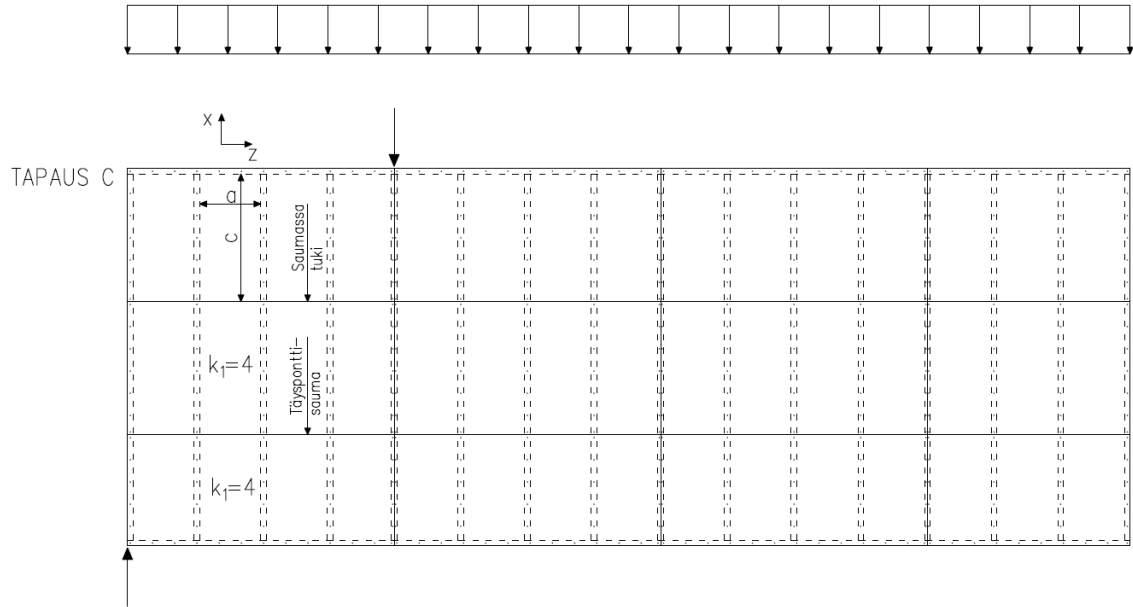
Yhtälön 12 mukaan leikkausjännitys jakaantuu poikkileikkauksen korkeussuunnassa parabolisesti, mikä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Parabolisesti jakaantunut leikkausjännityskenttä (Salmi & Pajunen 2010, kuva 196.2)

Leikkausjännitys saa tällöin huippuarvonsa poikkileikkauksen taivutuksen neutraaliakselin kohdalla, ollen 1,5-kertainen keskimääräiseen leikkausjännitykseen verrattuna. (Salmi & Pajunen 2010, s. 196) Yhtälöön 10 on sijoitettu suoraan tämä jännityksen huippuarvo.

Lommahdustarkastelun tarkoituksena on välttää levykentän lommahtamisesta aiheutuva jäykistysrakenteen stabiliteetin menetys. Tyypillisesti lommahdus tapahtuu rakenteille, jotka ovat jäykkiä kuormitussuunnassa, mutta joustavia tämän poikittaisessa suunnassa. Lommahdustarkastelussa käsitellään levyjä, joissa vaikuttaa suurin leikkausvoima. Tällöin tarkasteltavat levyt ovat tason päädyissä kuvan 7 mukaan.



Kuva 7. Lommahdustarkastelussa käsiteltävät levyt (RIL 205-1-2017, kuva 9.14fS, muokattu)

Jokaiselta reunaltaan nivelellisesti tuetun yksittäisen levyn kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen $f_{v,crit,i}$ määritetään kaavalla

$$f_{v,crit,i} = 3,3k^4 \sqrt{\frac{(EI)_{z,i}}{(EI)_{x,i}}} \frac{(EI)_{x,i}}{I_i} \left(\frac{t_i}{a_i}\right)^2, \quad (13)$$

missä

3,3 on termin $\frac{\pi^2}{3}$ likiarvo

k on levyn lommahduskerroin liitteen 2 käyrästä

$(EI)_{z,i}$ on levyn taivutusjäykkyys pituusyksikköä kohti, kun levyä taivutetaan z-akselin ympäri (kuva 7)

$(EI)_{x,i}$ on levyn taivutusjäykkyys pituusyksikköä kohti, kun levyä taivutetaan x-akselin ympäri (kuva 7)

I_i on levyn jäyhyysmomentti (neliömomentti) pituusyksikköä kohti

a_i on levyn tukien k-jako levyn pituussuunnassa kuvan 7 mukaan. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.10S)

Mikäli levyn taivutusjäykkyys on sama z-akselin ja x-akselin suhteen, yksinkertaistuu kaava 13 muotoon

$$f_{v,crit,i} = 3,3kE_i \left(\frac{t_i}{a_i}\right)^2, \quad (14)$$

missä E_i on levyn taivutuskimmomoduulin ominaisarvo. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.11S)

Lommahduskerroin k on dimensioton suure, jonka määrittäminen liitteen 2 kuvaajasta edellyttää apukertoimia k_1 ja k_2 . Kerroin k_1 määritetään kaavalla

$$k_1 = \frac{c_i}{a_i} \sqrt[4]{\frac{(EI)_{z,i}}{(EI)_{x,i}}}, \quad (15)$$

missä c_i on levyn tukien k-jako levyn leveyssuunnassa kuvan 7 mukaan. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.12S) Mikäli levyn taivutusjäykkyys on sama z-akselin ja x-akselin suhteen, yhtälö voidaan yksinkertaistaa kaavaksi 16. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.13S)

$$k_1 = \frac{c_i}{a_i} \quad (16)$$

Kerroin k_2 määritetään kaavalla

$$k_2 = \frac{1}{2} \frac{(GI)_{v,i}}{\sqrt{(EI)_{z,i}(EI)_{x,i}}}, \quad (17)$$

missä $(GI)_{v,i}$ on levyn vääntöjäykkyys. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.14S) Vääntöjäykkyys määritetään iso- ja ortotrooppiselle levyille kaavalla

$$(GI)_{v,i} = \frac{1}{3} G_i t_i^3, \quad (18)$$

missä G_i on levyn liukumoduulin ominaisarvo (paneelileikkaus). (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.15S) Mikäli levyn taivutusjäykkyys on sama z-akselin ja x-akselin suhteen, yhtälö 17 voidaan yksinkertaistaa kaavaksi 19. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.16S)

$$k_2 = \frac{2G_i}{E_i} \quad (19)$$

Jos tarkasteltavien levyjen tukemattomissa reunoissa on täysponttisauma, tulee apukertoimeksi valita $k_1 = 4$. Tällöin levyn lommahdustarkastelun lisäksi tulee tehdä levyn taivutusjännitystarkastelu kaavalla 20. Mikäli tarkasteltavien levyjen reunoissa ei ole täysponttisaumoja, tulee näihin järjestää tuenta, johon levyjen reunat kiinnitetään samalla tavalla kuin runkoon. (RIL 205-1-2017, s.169)

$$\sigma_{b,i} = \frac{6F_{f,Rd,i}a_i}{t_i c_i \gamma_{is_i}} \leq \min(f_{t,z,d}, k_{crit} f_{c,z,d}), \quad (20)$$

missä

$\sigma_{b,i}$	on levyn taivutusjännitys y-akselin suhteen
$f_{t,z,d}$	on levyn vetolujuuden mitoitusarvo suunnassa z (kuva 7)
$f_{c,z,d}$	on levyn puristuslujuuden mitoitusarvo suunnassa z (kuva 7)
k_{crit}	on mitan a pituisena ulokepalkkina toimivan levyn kiepahduskerroin. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.17S)

Suunnitteluohjeessa on annettu reunaehdot, jotka toteuttavan jäykistyslevyn taivutuskestävyyttä ei tarvitse tarkastaa. Taulukkoon 1 on koottu ohjeen mukaiset ehdot, jotka pätevät kahdelta reunalta tuetulle ja vapailta reunoiltaan pontatulle jäykistyslevylle.

Taulukko 1: Jäykistyslevyn taivutuskestävyyden tarkastuksen reunaehdot (RIL 205-1-2017, taulukko 9.3S, muokattu)

Levyn tyyppi	Viilupaksuus [mm]	$b = c$ [mm]	t [mm]	a_{max} [mm]	$F_{i,m,Rd}$ [kN]
Havuvaneri ₁	2,6...3,2	1200	15	600	7,0
Havuvaneri ₁	2,6...3,2	1200	18	900	5,1
Havuvaneri ₁	2,6...3,2	1200	21	1200	4,6
Havuvaneri ₁	1,4	1200	15	600	7,6
Havuvaneri ₁	1,4	1200	18	900	5,8
Havuvaneri ₁	1,4	1200	21	1200	5,1
Lastulevy	-	600	22	600	11,0
b = levyn leveys t = levyn paksuus c = tukemattomien reunojen välinen etäisyys ₁₎ Pintaviilun syysuunta mitan a suuntaan Ehdot: Hetkellinen aikaluokka Käyttöluokka 1 tai 2 Tukiväli $a \leq a_{max}$ Levyn vaakavoima $F_{i,v,Ed} \leq F_{i,m,Rd}$					

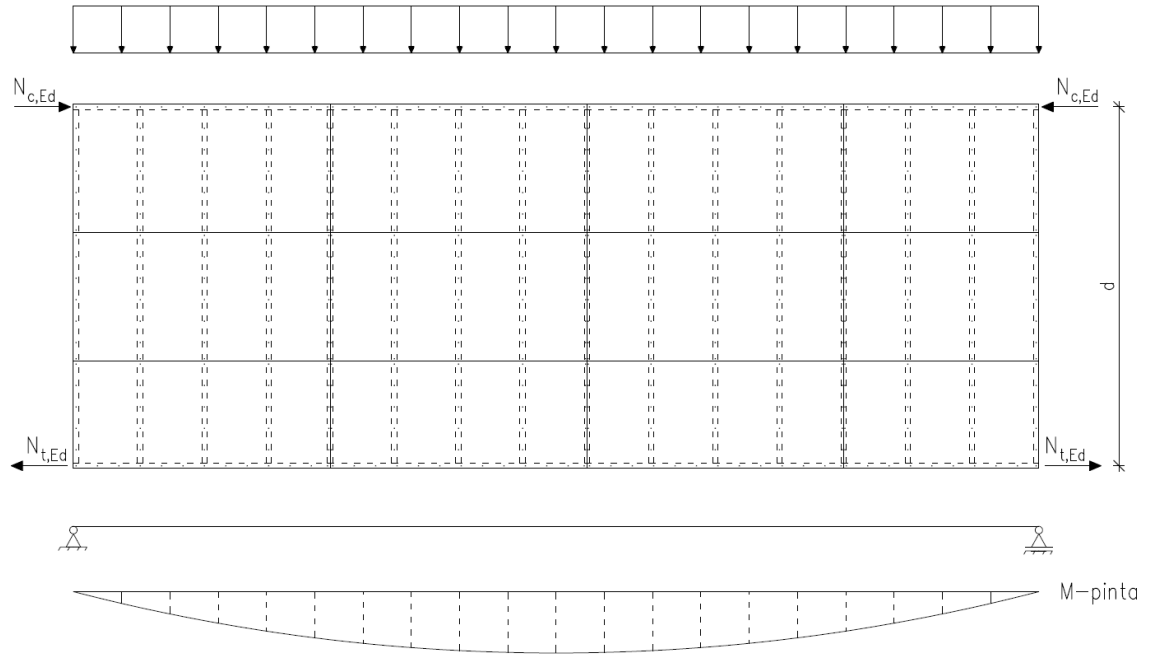
Reunapalkkien suunnittelussa tulee käyttää taivutusmomentista aiheutuvaa normaalivoimaa, kuten eurokoodin mukaisessa yksinkertaistetussa analyysissä. Normaalivoiman suuruudeksi on yksinkertaistettu suurimmasta tasossa vaikuttavasta taivutusmomentista aiheutuva voima. Voiman suuruus määritetään kaavalla

$$N_{c,Ed} = N_{t,Ed} = \frac{\max M_d}{d}, \quad (21)$$

missä

- $N_{c,Ed}$ on palkissa vaikuttava puristusvoima murtorajatilassa
 $N_{t,Ed}$ on palkissa vaikuttava vetovoima murtorajatilassa
 $maxM_d$ on suurin tasossa vaikuttava taivutusmomentti murtorajatilassa
 d on reunapalkkien etäisyys toisistaan. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.8S)

Kuvassa 8 on esitetty tason taivutusmomenttikuvaaja ja reunapalkeissa vaikuttavat normaalivoimat.



Kuva 8. Tason taivutusmomenttikuvio ja reunapalkkien normaalivoimat (RIL 205-1-2017, kuva 9.14dS, muokattu)

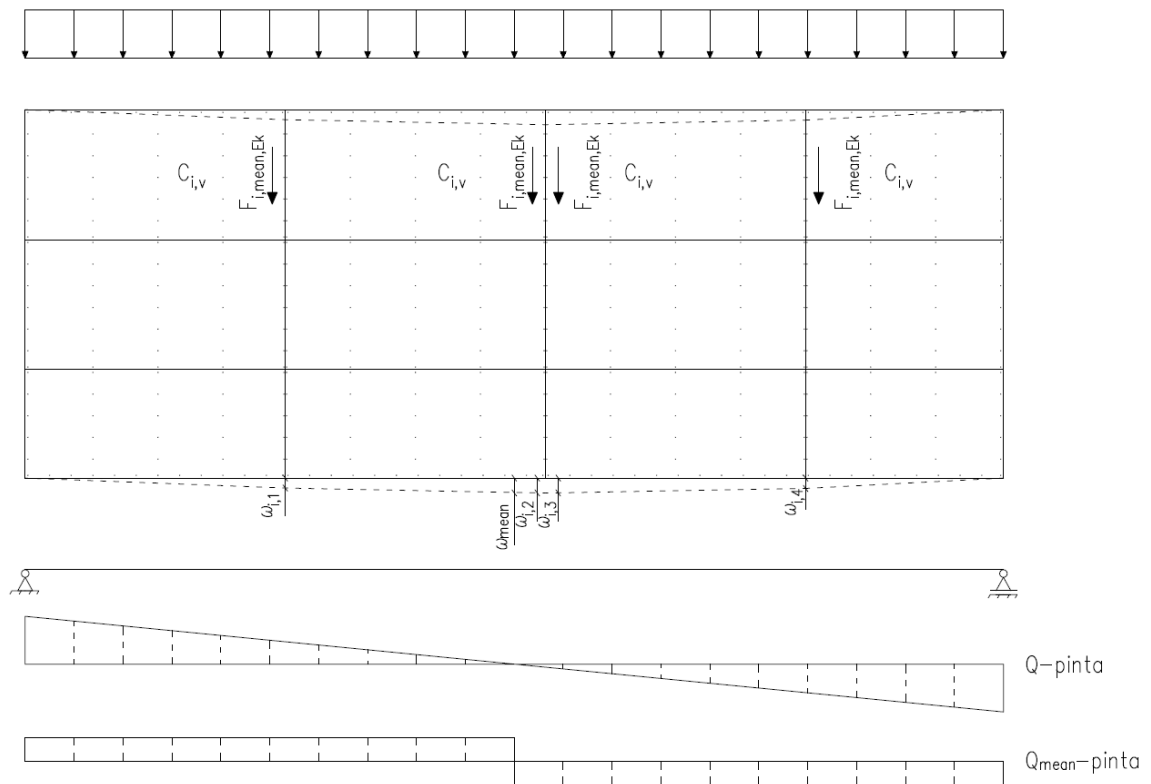
Suunnitteluohje määrittää kaavat levyjäykistystason siirtymille leikkausvoiman ja taivutusmomentin vaikutuksesta. Leikkausvoima aiheuttaa yksittäiselle levyille siirtymän $\omega_{i,v}$, joka määritetään kaavalla

$$\omega_{i,v} = \frac{F_{i,v,Ek}}{C_{i,v}}, \quad (22)$$

missä $F_{i,v,Ek}$ on yksittäistä levyä kuormittava vaakavoima käyttörajatilassa. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.4S) Kaksitukisen tason siirtymää määrittäessä kaavassa 22 käytetään kuormituksena keskimääräistä leikkausvoimaa Q_{mean} . Levyjonon siirtymää määrittäessä kaavassa 22 käytetään jonolle määritettyä jäykkyyskerrointa. Leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä levykentän jännevälin keskellä ω_{mean} määritetään levyjonojen siirtymien summasta kaavalla

$$\omega_{mean} = \frac{\omega_{i,1} + \omega_{i,2} + \omega_{i,3} + \omega_{i,n}}{2}, \quad (23)$$

missä $\omega_{i,n}$ on keskimääräisen leikkausvoiman aiheuttama levyjonon siirtymä. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.5S) Kuvassa 9 on esitetty leikkausvoiman aiheuttama siirtymä yksiaukkoiselle jäykistystasolle.



Kuva 9. Leikkausvoiman aiheuttama siirtymä yksiaukkoiselle levyjäykistystasolle (RIL 205-1-2017, kuva 9.14bS, muokattu)

Taivutusmomentista aiheutuva siirtymä ω_m yksiaukkoiselle jäykistystasolle on riippuvainen käytettävien reunapalkkien dimensioista ja lujuudesta. Siirtymä johdetaan tasaisesti kuormitetun yksiaukkoisen palkin taipumasta, joka saa suurimman arvonsa jännevälin keskellä. Taipuman v_{max} suuruus määritetään kaavalla

$$v_{max} = v\left(\frac{1}{2}L\right) = \frac{5q_0L^4}{384EI}, \quad (24)$$

missä

q_0 on tason tasaisen kuorman suuruus käyttörajatilassa

L on tason jänneväli

E on tasorakenteen kimmomoduuli

I on tasorakenteen neliömomentti. (Salmi & Pajunen 2010, liite 2 taulukko 1)

Taivutusmomentti otetaan vastaan reunapalkkeilla. Tällöin tasorakenteen neliömomentti muodostuu vain palkkien neliömomenteista. Neliömomentin I suuruus määritetään kaavalla

$$I = 2 \left[\frac{1}{12} b h^3 + A \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] = \frac{1}{6} b h^3 + \frac{1}{2} A d^2, \quad (25)$$

missä

b on reunapalkin leveys
 h on reunapalkin korkeus
 A on reunapalkin poikkileikkauksen pinta-ala.

Tasossa vaikuttava taivutusmomentti saa suurimman arvonsa tason jännevälän keskellä. Tällöin tasaisen kuorman q_0 suuruus voidaan esittää yhtälönä

$$q_0 = \frac{8M_k}{L^2}, \quad (26)$$

missä M_k on tason suurin taivutusmomentti käyttörajatilassa. Kun yhtälöt 25 ja 26 sijoitetaan taipumakaavaan 24, saadaan tarkaksi tulokseksi

$$v_{max} = \frac{5M_k L^2}{8Eb h^3 + 24d^2 AE}. \quad (27)$$

Yhtälön yksinkertaistamiseksi tasorakenteen neliömomentin arvossa huomioidaan vain Steinerin lauseesta määritettävä termi $\frac{1}{2} A d^2$, joka on määräävä. Tulos on varmalla puolella, ja tällöin taipuman suuruus määritetään kaavalla

$$\omega_m = \frac{5M_k L^2}{24d^2 A_p E_p}, \quad (28)$$

missä

A_p on reunapalkin poikkileikkauksen pinta-ala
 E_p on reunapalkin kimmomoduuli. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.6S)

Tason kokonaisvaakasiirtymässä ω_{tot} huomioidaan sekä leikkausvoiman että taivutusmomentin aiheuttama siirtymä. Siirtymän suuruus jännevälän keskellä määritetään kaavalla

$$\omega_{tot} = \omega_{mean} + \omega_m. \quad (29)$$

Rakennuksen kokonaisvaakasiirtymää ω määritettäessä tulee jäykistävän levykentän siirtymän lisäksi huomioida jäykistävien päätyseinien vaakasiirtymä. Rakennuksen vaakasiirtymän enimmäisarvon tulee RIL 205-1-2017 taulukon 7.2-FI mukaan täyttää ehto

$$\omega \leq H/300, \quad (30)$$

missä H on rakennuksen tarkastelukohdan korkeus. Suunnitteluohjeen mukaan hallirakennuksissa vaakasiirtymästä ei yleensä ole haittaa, jolloin sitä ei tarvitse tarkistaa. Kerrostaloissa vaakasiirtymän suuruus suositellaan rajoitettavan arvoon $H/500$ ylimmän kerroksen lattiatasolla. (RIL 205-1-2017, s. 98)

Suunnitteluohje jättää standardin SFS-EN 1995-1-1 tapaan levyjäykistystason rakennemallivalinnan, monimuotoisuuden, liittyvät rakenteet, päällekkäisten levyjen vaikutuksen ja yksityiskohtien suunnittelun huomioimatta. Ohjeen yleinen levyjäykisteen mitoitusmenetelmä on kattavampi kuin standardin SFS-EN 1995-1-1 mukainen yksinkertaistettu analyysi, mutta kiinnitystapakertoimien rajallisuus rajoittaa menetelmän käytettävyyttä. Kiinnitystapakertoimet γ ja β tulee valita liitteen 1 taulukosta, jonka laajuus on rajattu kahdeksaan kiinnitystapaan. Ongelmana on, että käytännössä toteutettavat kiinnitystavat poikkeavat taulukossa esitetyistä tapauksista. Taulukon kiinnitystapauksissa 1...4 käytetään eurokoodin tapaan liittimiä levyjen jokaisella sivulla, mikä vaatisi apuruoteet levyjen tukemattomiin päätyihin. Tapauksissa 5...8 liitinrivit on sidottu levyn pituuteen, jonka vuoksi tavanomaiset runkojaot k300...k600 ovat useilla levytyypeillä tavoittamattomissa. Lisäksi taulukko ei huomioi levy- ja liitintyyppikohtaisia liitinten reunaetäisyyksiä, jotka todellisuudessa vaikuttavat levyn toimintaan. Mitoituksen yksinkertaistamiseksi on oletettu, että levyjen päätysaumat ovat samassa linjassa, eli samalla kannattajalla. Ohjeen kuvassa 9.14aS on huomautettu, että rakennusvaiheessa levyt tulisi silti pyrkiä limitämään. Limityksen todellinen vaikutus tason toimintaan jätetään laskennassa huomiotta.

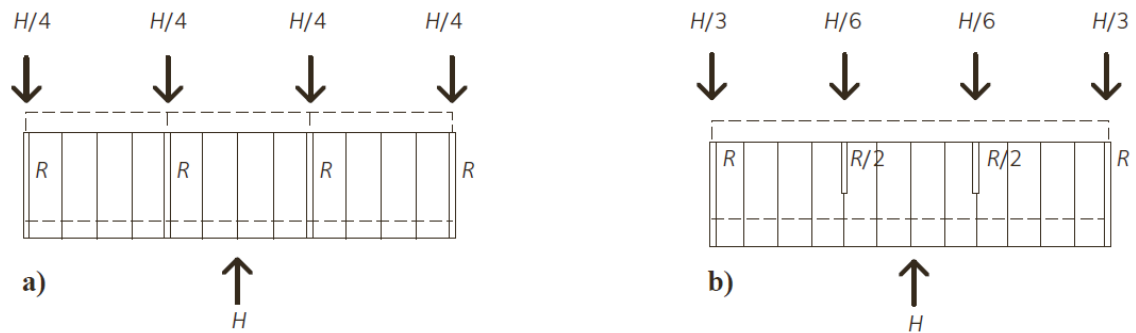
2.3 Design of timber structures, Ruotsi

Design of timber structures on kolmiosainen puurakenteiden suunnitteluohje, jonka on julkaissut The Swedish Forest Industries Federation ja koonnut tämän alainen osasto Swedish Wood. Swedish Wood jakaa tietoa ja pyrkii kehittämään puutuotteita ja -rakentamista. Osaston tukijoina vaikuttavat Ruotsin saha- ja liimapuuteollisuus. Suunnitteluohje on kehitetty rakennesuunnittelijoiden ja opiskelijoiden käyttöön, ja on saatavana myös ruotsinkielisenä julkaisuna Dimensionering av träkonstruktioner Del 1-3. Ohjeen viimeisin versio on päivitetty vuonna 2016. (Swedish Wood 2018)

Ohjeen ensimmäisessä osassa (Design of timber structures Volume 1) käsitellään puurakenteiden teoriaa rakenteellisesta näkökulmasta. Esitetyt teoriat noudattavat eurokoodeja ja Ruotsin kansallisia määräyksiä. Toisessa osassa (Design of timber structures Volume 2) esitetään eurokoodin ja Ruotsin kansallisten määräysten mukaiset rakenteiden mitoituksessa käytettävät laskentamenetelmät. Kolmas osa (Design of timber structures Volume 3) sisältää rakenteiden laskentaesimerkkejä, jotka noudattavat kahta edellistä ohjeen osaa. (Swedish Wood 2018)

Suunnitteluohjeen ensimmäisen osan luku 6 käsittelee rakennusten jäykistystä. Luku sisältää yleistä teorian tietoa jäykistykseen tarpeellisuudesta ja käytettävissä olevista menetel-

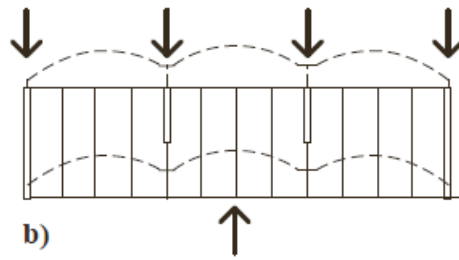
mistä. Alaluvussa 6.3 käsitellään jäykistysrakenteiden statiiikkaa. Ohjeen mukaan vaakasuuntainen jäykistystaso voidaan määrittää jäykäksi (rigid), osittain jäykäksi (semi-rigid) tai joustavaksi (flexible). Taso määritetään jäykäksi, mikäli se on tuettu kantavilla pystysuuntaisilla rakenteilla, jotka ovat yhdensuuntaisia ja riittävän lähellä toisiaan. Normaalisti jäykäksi tasoksi oletetaan betonilaatat ja osa teräskansirakenteista. Jäykkä taso siirtää vaakasuuntaiset kuormitukset jäykistäville pystyrakenteille näiden jäykkyyksien suhteessa, josta on esitetty esimerkki kuvassa 10.



Kuva 10. Jäykän tason siirtämät kuormitukset jäykistäville pystyrakenteille (*Design of timber structures Volume 1, kuva 6.8*)

Kuvan 10 a) kohdassa on esitetty tapaus, jossa pystysuuntaiset jäykistysrakenteet ovat yhtä jäykkiä toistensa suhteen. Tällöin tasoa kuormittava voima jakautuu tasan näiden kesken. Kuvan 10 b) kohdassa pystysuuntaisten jäykistysrakenteiden jäykkyydet eivät ole yhtä suuret, jolloin tasoa kuormittava voima jakautuu näille jäykkyyksien suhteessa. Mikäli tason rakennemalli on jäykkä, tulee suunnittelussa huomioida myös rakenteisiin kohdistuvat vääntövaikutukset. Vääntöä aiheutuu kuormien epäkeskisyydestä jäykkyysskeskiöön nähden. (Design of timber structures Volume 1, s. 206-207)

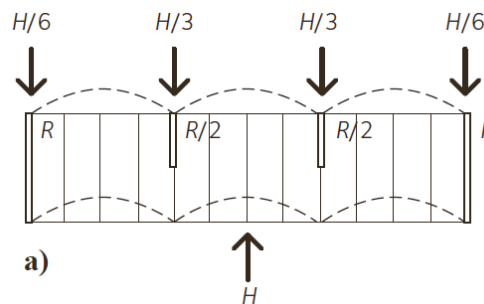
Ohje huomauttaa, että mikäli jäykkää tasoa tukevat pystysuuntaiset jäykistävät rakenteet ovat kaukana toisistaan, ei tason jäykkyys ole yksiselitteistä. Tässä tapauksessa tason rakennemalli on jäykän ja joustavan tason välillä, jolloin kuormien jakaantuminen on riippuvainen vaakasuuntaisen tason ja pystysuuntaisten jäykistysrakenteiden jäykkyyksien suhteesta. Kuvassa 11 on esitetty esimerkki osittain jäykän tason toiminnasta.



Kuva 11. Osittain jäykän tason toiminta (*Design of timber structures Volume 1, kuva 6.9 b)*)

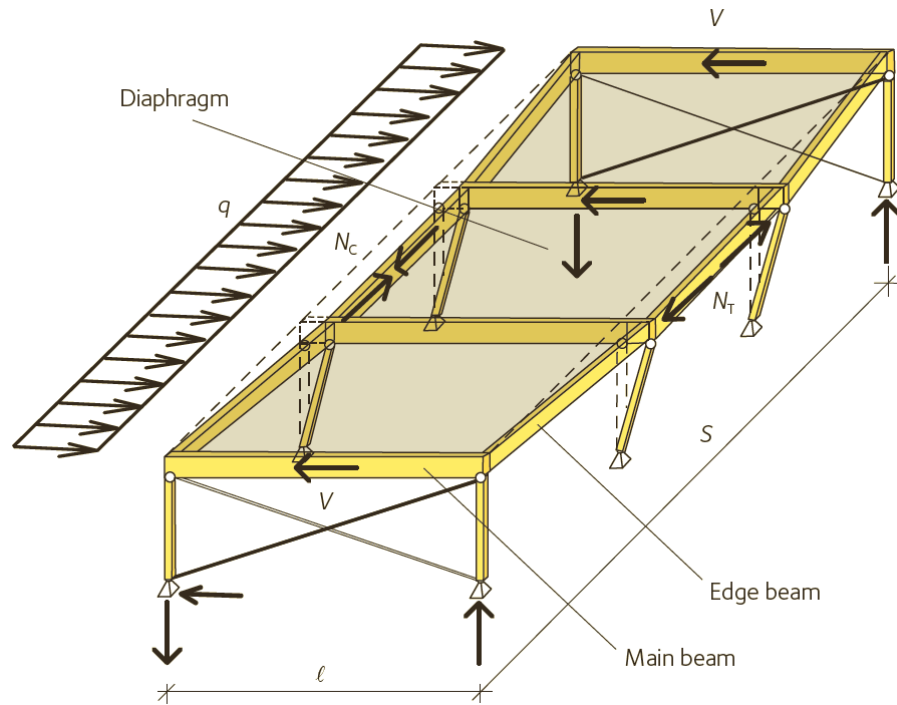
Osittain jäykän tason toiminnan tarkka määrittäminen todetaan vaikeaksi. Tasojen oletetaan jakavan kuormat pystysuuntaisille jäykistysrakenteille kuten jatkuva palkki joustavilla tuilla. Lisäksi todetaan, että tasot eivät todellisuudessa koskaan ole täysin jäykkiä tai joustavia tasoja, vaan jotain näiden väliltä. (Design of timber structures Volume 1, s.206)

Puurakennuslevyillä rakennetut vaakasuuntaiset jäykistystasot oletetaan yleensä joustaviksi. Näiden joustavuus on yleensä tasoa kannattavia pystysuuntaisia jäykistysrakenteita suurempi, jonka vuoksi pystysuuntaiset rakenteet oletetaan jäykiksi. Joustavan tason rakennemalli voidaan ajatella nivelellisesti jäykkiin pystyrakenteisiin tuetuiksi epäjatkuviksi palkeiksi. Tällöin tason kuormitukset siirtyvät jäykistäville pystyrakenteille vaikutusalojensa mukaan, huomioimatta pystyrakenteiden todellisia jäykkyyksiä. Kuvassa 12 on esitetty esimerkki joustavan tason toiminnasta. (Design of timber structures Volume 1, s.206-207)



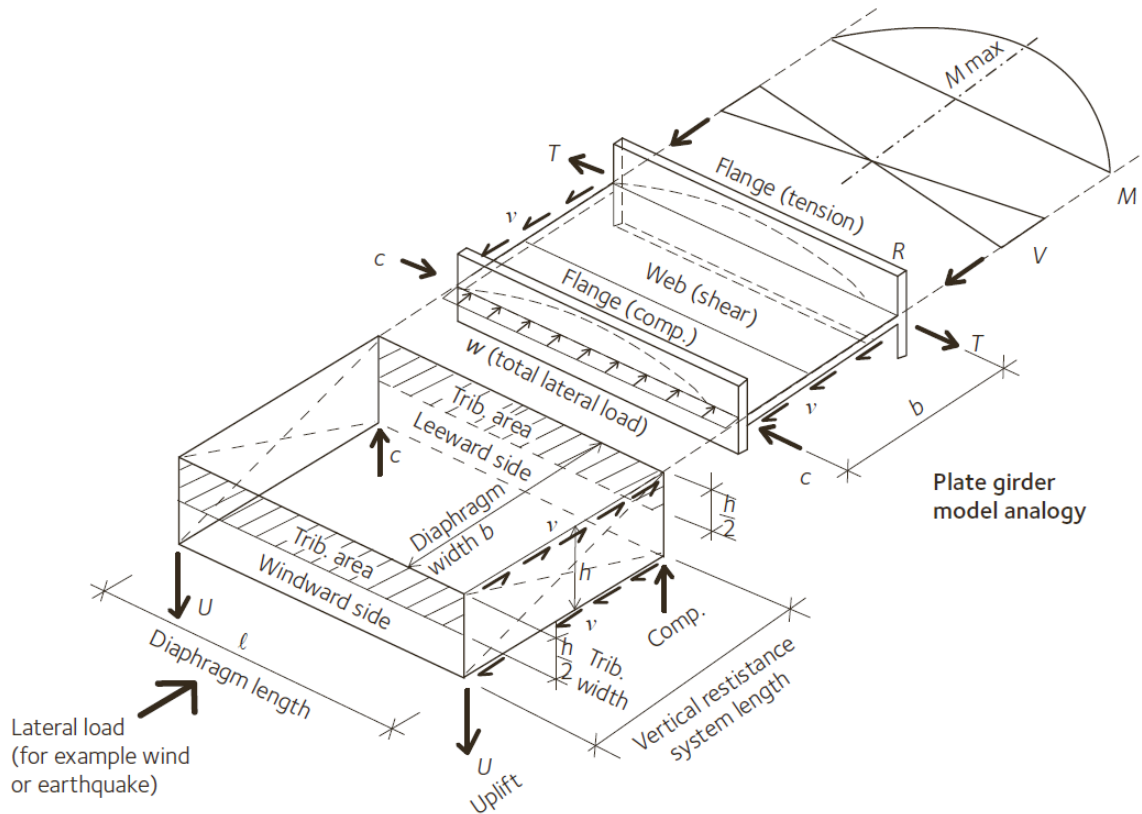
Kuva 12. Joustavan tason toiminta (*Design of timber structures Volume 1, kuva 6.9b)*)

Kuvassa 13 on havainnollistettu joustavan jäykistystason toimintaa pilari-palkkirunkoissa hallirakennuksessa.



Kuva 13. Joustavan levyjäykistystason toiminta hallirakennuksen yläpohjana (*Design of timber structures Volume 1, kuva 6.34*)

Levyjäykistystason toimintaa kuvataan korkeana levypalkkina tai I-palkkina, joissa levykenttä toimii leikkausrasitusta vastustavana uumana ja kentän reunoilla olevat palkit taivutusmomenttia vastustavina laippoina. Kuvassa 14 on esitetty suunnitteluohjeen mukaisen levyjäykistystason rakenneosat ja analogia I-palkkiin. (*Design of timber structures Volume 1, s.226*)



Kuva 14. Levyjäykistystason analogia I-palkkiin (*Design of timber structures Volume 1, kuva 6.35*)

Kuvan 14 yksiaukkoisen jäykistystason rakenneosissa vaikuttavat voimasuureet voidaan määrittää yksiaukkoisen palkin statiikasta. Tällöin suurin tasossa vaikuttava taivutusmomentti on jännevälin keskellä ja suurimmat leikkausvoimat tason päädyissä. Taivutusta vastustavien reunapalkkien ja näiden mahdollisten jatkosten tulee kestää taivutusmomentista aiheutuva normaalivoimarasitus, jonka suuruus määritetään kaavalla

$$T = C = \frac{M}{b} = \frac{wl^2}{8b}, \quad (31)$$

missä

T	on palkissa vaikuttava vetovoima
C	on palkissa vaikuttava puristusvoima
M	on tasossa vaikuttava taivutusmomentin maksimiarvo
b	on reunapalkkien välinen etäisyys
w	on tasaisen kuorman suuruus
l	on tason jänneväli. (<i>Design of timber structures Volume 1, kaava 6.32</i>)

Leikkausrasituksen oletetaan olevan tarkastelupisteen poikkileikkauksessa vakio tason leveyssuunnassa, jolloin levyjen kiinnityksen mitoittava leikkausvoima pituusyksikköä kohden v määritetään kaavalla

$$v = V/b, \quad (32)$$

missä V on päädyssä vaikuttava leikkausvoima. (Design of timber structures Volume 1, kaava 6.33) Levyjen kiinnitysliittimien jakoväli tulee valita siten, että liitos kestää päädyssä vaikuttavan leikkausvoiman. Tällöin yksittäisen liittimen tulee kestää leikkausvoima F_v , joka määritetään kaavalla

$$F_v = v s, \quad (33)$$

missä s on liittimien välinen etäisyys. (Design of timber structures Volume 1, s. 227) Lisäksi käytettävän jäykistyslevyn tulee kestää tässä vaikuttava leikkausjännitys τ , joka määritetään kaavalla

$$\tau = v/t, \quad (34)$$

missä t on levyn paksuus. (Design of timber structures Volume 1, s. 227) Suunnitteluohje huomauttaa, että levykentän mitoittamisprosessi sisältää yksinkertaistuksia, koska kentän todellisen jäykkyyden ja tarkan staattisen toimintamallin määrittäminen on haastavaa. (Design of timber structures Volume 1, s.226-227)

Suunnitteluohje sisältää laajemman teoriaosuuden kuin eurokoodi, mutta on silti puuteellinen käytännön suunnittelun kannalta. Eurokoodin tapaan tason taipumaa, päällekkäisiä levyjä, levyjen limityksiä, liittyvien rakenteiden liitoksia ja yksityiskohtien suunnittelua ei huomioida. Jäykistystason mitoituksessa liitinjako määritetään tason päädyssä vaikuttavalle leikkausvoimalle, mutta liittimien todelliseen sijoittamiseen ei oteta kantaa. Kiinnityskaaviot ja näiden vaikutukset jäävät näin täysin huomiotta.

2.4 Design of Wood Structures, USA

Design of Wood Structures on kattava puurakenteiden suunnitteluohje, joka on koottu Yhdysvalloissa voimassa olevien määräysten ja puuteollisuuden tuottamien suunnitteluohjeiden perusteella. Ohjeen on julkaissut McGraw-Hill Education, ja lähteinä olevien julkaisujen taustalla ovat mm. American Wood Council (AWC), International Code Council (ICC), American Society of Civil Engineers (ASCE), APA - The Engineered Wood Association ja American Institute of Timber Construction (AITC). Julkaisun tavoitteena on helpottaa puurakenteiden suunnittelemista, ja sitä voidaan käyttää sekä kurssimateriaalina että omatoimisesti. Ohje kokoaa yhteen erilaisten rakenneosien suunnittelussa tarvittavat teoriat, sisältäen käytännöllisiä esimerkkilaskelmia. (Breyer et al. 2016)

Kirjan yhdeksäs luku käsittelee vaakasuuntaisia levyjäykistystasoja. Levyjäykistystaso määritetään laaja-alaiseksi, mutta ohueksi rakennekokonaisuudeksi, jota kuormitetaan tason suunnassa. Taso koostuu levytyksestä, levyjen kiinnitysrungosta ja tason reunoilla olevista reunapalkeista. Rakenneosien väliset liitokset suunnitellaan siten, että taso toimii yhtenä rakennekokonaisuutena. Levyjäykistystason rakennemalliin vaikuttaa tämän jäykkyys, eli kuormituksesta aiheutuvan taipuman suuruus tason suunnassa. Tason rakennemalli valitaan taipuman suuruuden mukaan joustavaksi, osittain jäykäksi tai jäykäksi. (Breyer et al. 2016)

Rakennemallivalinta vaikuttaa oleellisesti tason voimasuureiden siirtämiseen. Joustavan levyjäykistystason voidaan ajatella toimivan kuten korkea palkki, joka siirtää tasossaan vaikuttavat kuormitukset tukilinjoina toimiville pystysuuntaisille jäykistysrakenteille. Jäykkä taso siirtää kuormituksensa pystysuuntaisille jäykistysrakenteille näiden jäykkyyksien suhteessa, huomioiden myös rakenteiden sijainneista ja kuormien epäkeskisyysistä aiheutuvat vääntövaikutukset. Osittain jäykät levyjäykistystasot suunnitellaan yleensä tietokoneavusteisesti ja näiden rakenteellinen toimintatapa on joustavan ja jäykän tason toiminnan välimuoto. Tekijät huomauttavat, että todellisuudessa kaikki levyjäykistystasot ovat osittain jykkiä, joustavat ja jäykät tasot ovat suunnittelun yksinkertaistuksia. (Breyer et al. 2016)

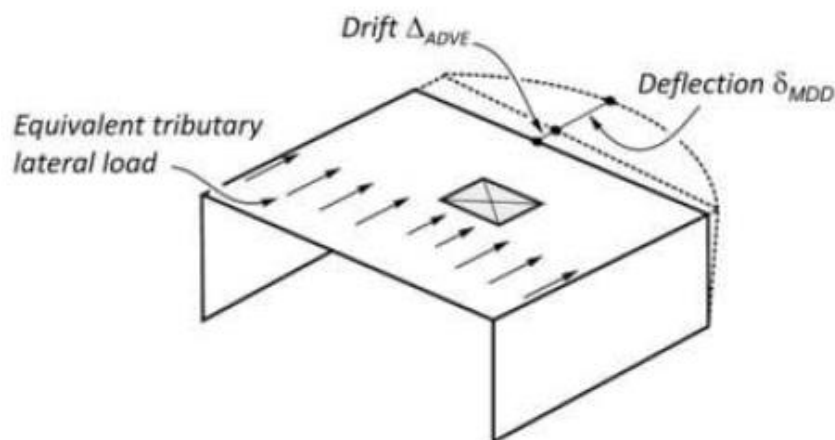
Tekijät viittaavat tason rakennemallin määrittämisperusteissa standardiin ASCE/SEI 7 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Standardin mukaan teräs- tai puulevyrakenteiset levyjäykistystasot voidaan idealisoida joustaviksi tietyissä rakennetapauksissa:

- Pystyrakenteet ovat jäykistettyjä teräskehiä tai jäykistettyjä teräksestä ja betonista valmistettuja liittorakennekehiä
- Pystyrakenteet ovat betonisia, muurattuja tai teräksestä ja betonista valmistettuja liittorakenteisia jäykistysseiniä
- Yhden tai kahden perheen -kokoluokan asuinrakennuksissa
- Rankarunkoisissa rakennuksissa, joissa:
 - o jäykistystason mahdolliset betoniset pintavalukerrokset eivät ole yli 1,5 tuumaa (38 mm) paksuja
 - o kaikkien pystysuuntaisten jäykistyslinjojen siirtymä jäykistystasossa toteuttaa standardin taulukon 12.12-1 mukaiset raja-arvot (liite 3). (ASCE/SEI 7-16, s. 96)

Edellisten rakennetyyppien lisäksi kaikki levyjäykistystasot, jotka laskennalla todenneetaan standardin ASCE/SEI 7-16 kohdan 12.3.1.3 ehdon täyttäviksi, voidaan suunnitella joustavina. Ehto määritetään yhtälönä

$$\frac{\delta_{MDD}}{\Delta_{ADVE}} > 2, \quad (35)$$

missä δ_{MDD} on jäykistystason taipuma (deflection) ja Δ_{ADVE} on pystysuuntaisten jäykistysrakenteiden siirtymä (drift) jäykistystasossa kuvan 15 mukaan. (ASCE/SEI 7-16, kaava 12.3-1)

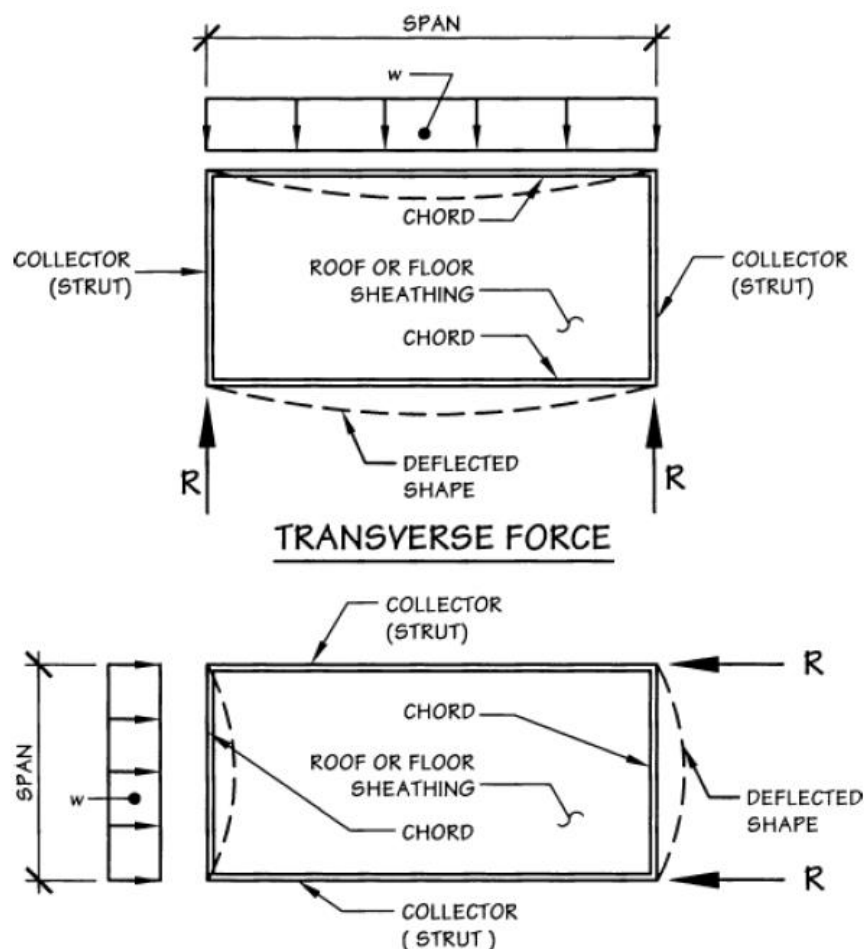


Kuva 15. Levyjäykistystason rakennemallin määrittämisessä käytettävät suureet (ASCE/SEI 7-16 2017, kuva 12.3-1)

Kaavassa 35 käytettävä kuormitus tulee olla standardin ASCE/SEI 7-16 kohdan 12.8 mukainen, jossa määritetään maanjäristyksistä aiheutuvat vaakakuormat. Teräslevyrakenteiset levyjäykistystasot, joiden pintarakenteena on rakenteellinen betonilaatta, sekä tason pituuden ja leveyden suhde on pienempi kuin 3:1, voidaan suunnitella jäykkinä. (Breyer et al. 2016)

Tekijät toteavat, että standardin ASCE/SEI 7-16 vaatimuksien vuoksi huomattava osuus rakennuksissa käytettävissä levyjäykistystasoista tulisi suunnitella osittain jäykkänä. Esimerkiksi puurunkoisissa levyseinäjäykistetyissä yli kaksiperheisissä asuinrakennuksissa oletus tason joustavuudesta ei päde ilman laskennallista todentamista. Osittain jäykän levyjäykistystason tapauksessa suunnittelu voidaan tehdä kahdella oletuksella; joustavalla ja jäykällä tasolla, joiden voimasuureista valitaan jäykistysrakenteiden rakenneosille mitoitavimmat voimatapaukset. Toimintatapa on mahdollinen, sillä osittain jäykän levyjäykistystason toimintatapa on todellisuudessa joustavan ja jäykän tason välimuoto. Toisaalta tekijät toteavat, että standardin ASCE/SEI 7-16 mukainen neljäs rakennetyyppiehto (betonipeitteen paksuus alle 1,5 tuumaa) mahdollistaa joustavan tason rakennemallin käytön useimmille puurakenteisille levyjäykistystasoille. (Breyer et al. 2016)

Levyjäykistystason suunnittelussa hyödynnetään analogiaa I-palkkiin, jossa laipat ottavat vastaan taivutusmomenttirasituksen ja uuma leikkausrasituksen. Levykenttä (sheathing) toimii tason uumana ja kentän reunoilla olevat reunapalkit (chord) laippoina. Tekijät huomauttavat, että tason kuormitus suunnan muuttuessa myös tason reunapalkkien sijainnit muuttuvat. Kuvassa 16 on esitetty levyjäykistystason rakenneosat kahdessa kuormitus-suuntatapauksessa. Lisäksi kuvassa on esitetty tason tukireaktiot ja taipuman muoto. (Breyer et al. 2016)

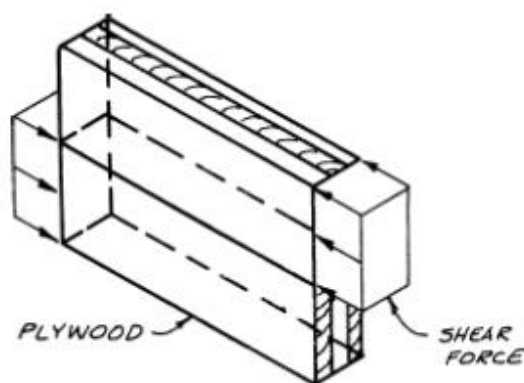


Kuva 16. Levyjäykistystason rakenneosat eri kuormitusuuntatapauksissa (Breyer et al. 2016, kuva 9.2)

Tekijät jakavat levyjäykistystason suunnittelun kuuteen osa-alueeseen:

- 1) levyjen paksuus
- 2) levyjen kiinnitystapa
- 3) levykentän reunapalkit (chord)
- 4) levykentän päätypalkit (collector, strut)
- 5) levykentän taipuma
- 6) liitokset ja ankkuroinnit.

Levyjäykistystason peruselementti on yksittäinen jäykistyslevy, joista levykenttä koostaan. Jäykistyslevyjen lisäksi levykenttä on mahdollista tehdä sahatavarasta, mutta yleisimmin käytössä ovat puurakennuslevyt, kuten erilaiset vanerituotteet. Levyjen asennustyö on tehokasta ja rakenteellinen kestävyys suhteellisen suuri, mikä tekee näistä myös taloudellisen valinnan. Valitun jäykistyslevytyypin paksuuden määrittää usein tasoa vastaan kohtisuorassa olevat kuormat, kuten esimerkiksi välipohjan hyötykuorma. Tekijät huomauttavat, että varsinkin välipohjien vaativat taipumarajat kasvattavat levyjen paksuutta. Tasonsa suunnassa levyjen tulee kestää levyjäykistystasossa vaikuttava leikkausvoima. Leikkautumistyyppi on tällöin kuvan 17 mukainen.



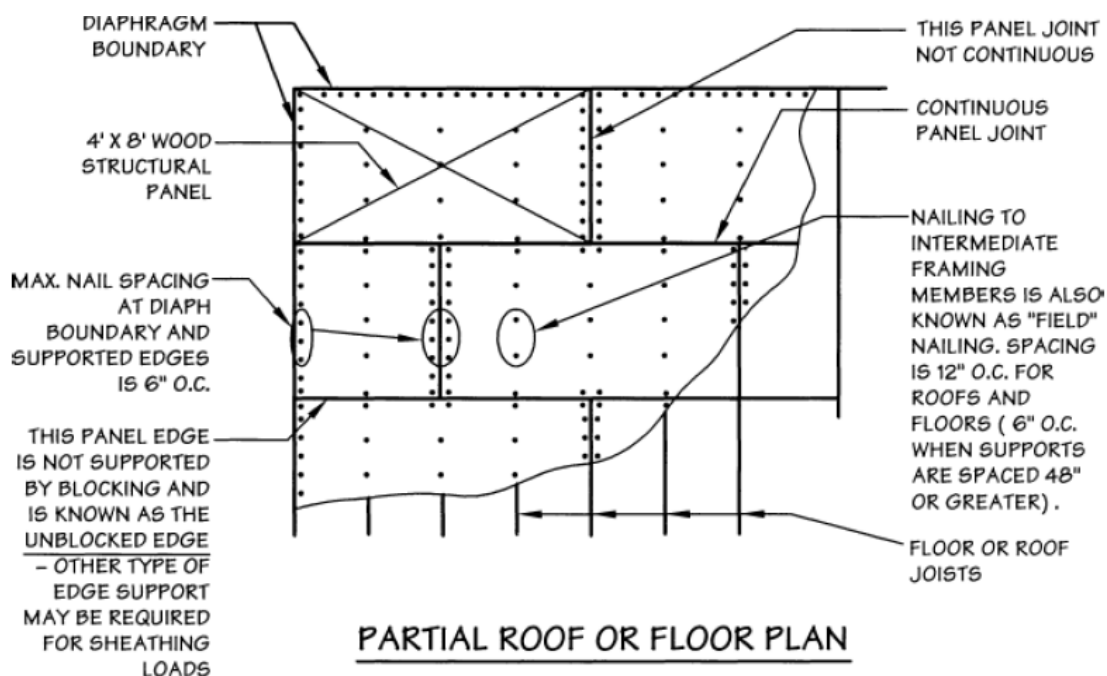
Kuva 17. Jäykistyslevyn leikkautuminen (Breyer et al. 2016, kuva 8.21a)

Leikkautuminen tapahtuu jäykistyslevyn paksuuden läpi (shear through the thickness), jolle levyvalmistajat ovat taulukoineet levykohtaiset kestävyysarvot. Levyn leikkauskestävyys tulee tarkistaa, mutta kentän mitoittavana tekijänä tulee olla kiinnitysliittimien kestävyys. (Breyer et al. 2016)

Levyjen kiinnitysliittimet mitoittava leikkausvoima vaihtelee eri kohdissa levyjäykistystasoa. Tekijät viittaavat levyjen kiinnityskaavioissa kahteen lähteeseen, jotka sisältävät levykohtaiset taulukkoarvot leikkauskapasiteeteille erilaisissa kiinnitystapauksissa. Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS), jonka on julkaissut American Wood Council, sisältää taulukot naula- ja ruuvikiinnityksille. International Building Code (IBC), jonka on julkaissut International Code Council, sisältää taulukot hakaskiinnityksille luvussa 23. (2015 International Building Code 2014) Taulukoista tulee valita tasorakenteen reunaehtojen mukaiset sarakkeet, joiden mukaan määritetään tason leikkausvoimakestävyys ominaisarvo v_w ja levyn leikkausmuodonmuutoksesta ja liittimen liukumasta aiheutuva liukumoduuli G_a . Leikkausvoimakestävyys ominaisarvoa tulee redusoida suunnittelumenetelmästä riippuen erilaisilla kertoimilla. Käytettäviä suunnitteluperusteita ovat Allowable Stress Design (ASD) ja Load and Resistance Factor Design (LRFD). ASD-menetelmä on vanhempi ja konservatiivisempi, perustuen rakenneosan jännityksien rajoittamiseen tiettyyn raja-arvoon. LRFD-menetelmä perustuu erilaisiin kuormien ja materiaalien varmuuskertoimiin, lähestyen eurokoodistandardien mukaista suunnittelua. Suunnitteluperusteiden laajempi käsittely ja vertailu sivuutetaan tämän diplomityön osalta. Suunnittelijan vastuulla on taulukoiden oikea tulkitseminen ja kiinnitystapausten soveltaminen. Esimerkkitaulukko lähteestä (SDPWS 2015) on liitteenä 4. (Breyer et al. 2016)

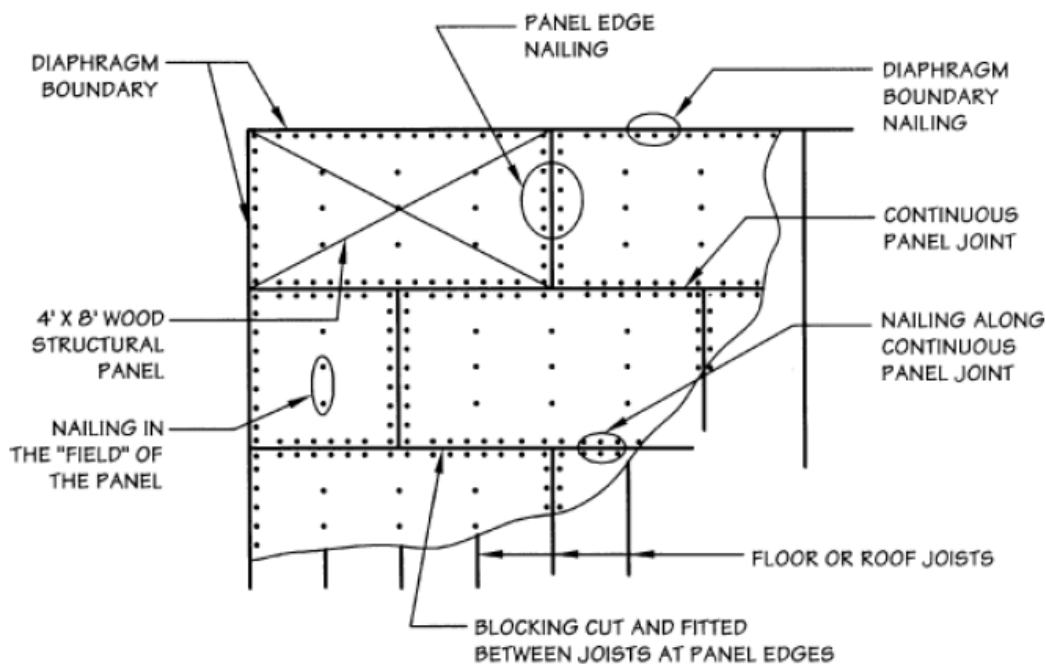
Levyn kiinnitystavat jaetaan kahteen perustyyppiin; avoimeen (unblocked) ja suljettuun (blocked) kiinnitystapaan. Mitoitustaulukot sisältävät levykohtaiset kestävyysarvot näille kiinnitystavoille tietyillä liitinjako- ja kuormitustapauksilla. Avoimessa kiinnitystavassa kaikki levyn reunat eivät ole tuettuina kiinnitysrunkoon. Nämä reunat voivat olla täysin tukemattomia (puskusauma viereisiin levyihin) tai esimerkiksi pontillisia. Liitinjaoksi levyn reunoilla on määrätty 6 tuumaa (152,4 mm), levyn keskellä sallittu liitinjako on 12

tuumaa (304,8 mm). Mikäli levyn keskellä olevien kiinnitysrivien välinen etäisyys on 48 tuumaa (1219,2 mm) tai enemmän, tulee myös näissä liitinriveissä käyttää 6 tuuman (152,4 mm) jakoväliä. Avoin kiinnitystapa on yksinkertainen, mutta myös kestävyysdel-tään heikompi kuin suljettu kiinnitystapa. Kuvassa 18 on esitetty tasokuva levyjäykistys-tasosta, jossa on käytetty avointa kiinnitystapaa.



Kuva 18. Tasokuva levyjäykistystasosta, jossa on käytetty avointa levyjen kiinnitystapaa (Breyer et al. 2016, kuva 9.5a)

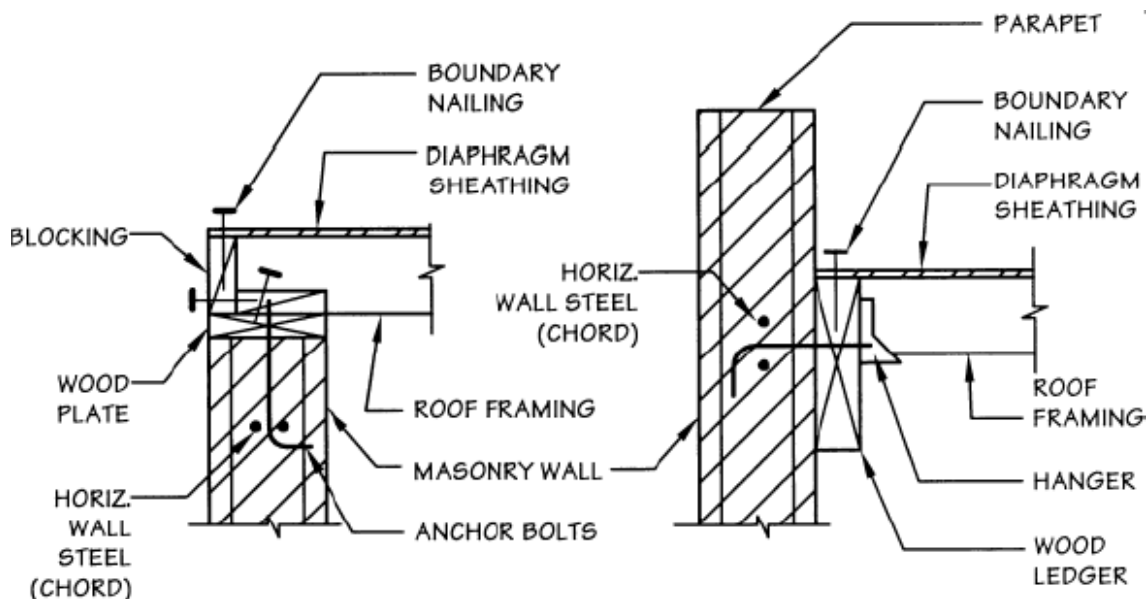
Suljetussa kiinnitystavassa levyjen kaikki reunat on kiinnitetty kiinnitysrunkoon. Tällöin levyssä vaikuttava leikkausvoima siirtyy suuremmin kiinnitysrungolle, minkä vuoksi myös kestävyys on suurempi. Vähimmäisliitinjako on määritetty 6 tuumaa (152,4 mm), mutta taulukot sisältävät myös tihennettyjen liitinjakojen mukaiset kestävyysarvot. Kuvassa 19 on esitetty suljetun kiinnitystavan mukainen levyjäykistystason tasokuva. (Breyer et al. 2016)



Kuva 19. Tasokuva levyjäykistystasosta, jossa on käytetty suljettua levyjen kiinnitystapaa (Breyer et al. 2016, kuva 9.5b)

Levyjäykistystason reunapalkit mitoitetaan tasossa vaikuttavasta taivutusmomentista aiheutuville normaalivoimille. Normaalivoiman suuruus palkissa noudattaa tason taivutusmomenttikuvaajan muotoa, jolloin esimerkiksi yksiaukkoisena suunniteltavan tason mitoittava piste on jännevälän keskellä. Varmalla puolella oleva yksinkertaistus on suunnitella palkit tälle voimalle koko pituudeltaan. Tekijät huomauttavat, että palkkien jatkokset tulee toteuttaa siten, että voimat siirtyvät rakenneosalta toiselle luotettavasti. (Breyer et al. 2016)

Reunapalkkeina käytetään rakennuskohtaisesti erilaisia rakenneratkaisuja. Puurunkoisissa rakennuksissa palkkeina käytetään yleensä tasoa tukevien jäykistysseinien kaksinkertaisia yläjuoksuja. Mikäli yläjuoksujen jatkokset toteutetaan limittämällä, tulee limityksen pituus olla vähintään 4 jalkaa (1,22 m) ja naulauksen voimansiirtoon riittävä. Liitoksessa voidaan käyttää myös ruuveja, pultteja tai teräsvanteita, mikäli naulauksella ei saavuteta riittävää kestävyyttä. Puurakenteisia levyjäykistystasoja käytetään myös rakennuksissa, joissa kantavat seinät ovat muurattuja tai betonisia. Näissä tapauksissa tason reunapalkkeina käytetään usein seinien yläreunoihin sijoitettuja raudoitusteräksiä. Suunnittelussa käytetään oletusta, jonka mukaan muuratut ja betoniset rakenteet toimivat vain puristusrasitusta vastaan. Tällöin reunapalkkien teräkset mitoittaa palkissa vaikuttava vetovoima. Voimansiirto jäykistystasolta seinärakenteelle ja tämän sisällä olevalle raudoitukselle edellyttää riittävää ankkurointia. Kuvassa 20 on esitetty raudoitusteräksiset reunapalkkiratkaisut muuratussa seinärakenteessa, jota voidaan soveltaa myös betoniseiniin. (Breyer et al. 2016)



Kuva 20. Levyjäykistystason reunapalkkiratkaisu muuratuissa seinissä (Breyer et al. 2016, kuva 9.8)

Tekijät huomauttavat, että reunapalkeiksi voidaan suunnitella myös muita rakennetyyppejä. Esimerkiksi suurien seinäaukokuksien kohdalla aukkopalkkia voidaan hyödyntää tason reunapalkkina. (Breyer et al. 2016)

Levyjäykistystason taipuman suuruus tasonsa suunnassa määrittää suunnittelussa käytävän rakennemallin. Tämän lisäksi taipuma vaikuttaa tasoon liittyviin seinärakenteisiin. Tekijät toteavat, että taipuma ei yleensä aiheuta ongelmia seinärakenteille, jotka ovat itsessään joustavia ja muodonmuutoksia kestäviä, kuten puurakenteiset seinät. Mikäli taipuma on suuri ja seinärakenteet jäykkiä, sekä muodonmuutoksille herkkiä, saattaa rakenteille aiheutua liian suuria jännitystiloja ja vaurioita. Tällaisia seinärakenteita ovat esimerkiksi muuratut seinät. (Breyer et al. 2016)

Taipuma huomioidaan tason suunnittelussa kahdella eri menetelmällä. Ensimmäisessä tapauksessa taipuman todellista suuruutta ei määritetä, mutta tämän suuruutta rajoitetaan määrittämällä levyjäykistystason pituuden ja leveyden suhteelle raja-arvo. Taulukkoon 2 on koottu tason muotosuhteiden raja-arvot erilaisille jäykistysmateriaaleille ja kiinnitystavoille.

Taulukko 2: Levyjäykistystason muotosuhteiden raja-arvot (SDPWS 2015, taulukko 4.2.4, muokattu)

Diaphragm Sheathing Type	Maximum L/W Ratio
Wood structural panel, unblocked	3:1
Wood structural panel, blocked	4:1
Single-layer straight lumber sheathing	2:1
Single-layer diagonal lumber sheathing	3:1
Double-layer diagonal lumber sheathing	4:1

Menetelmä olettaa, että mikäli tason mittasuhteet ovat rajojen mukaiset, taipuma on riittävän pieni, eikä taipuman todellista suuruutta ole tarpeellista määrittää. (Breyer et al. 2016)

Toisessa menetelmässä taipuman suuruus δ_{dia} (in.) määritetään laskennallisesti SDPWS 2015 kohdan 4.2.2 mukaan kaavalla

$$\delta_{dia} = \frac{5vL^3}{8EAW} + \frac{0,25vL}{1000G_a} + \frac{\Sigma(\Delta_c x)}{2W}, \quad (36)$$

missä

v	on tason suurin leikkausvoima pituusyksikköä kohti (lbs/ft)
L	on tason jänneväli (ft)
E	on reunapalkkien kimmomoduuli (psi)
A	on reunapalkkien poikkileikkauspinta-ala (in. ²)
W	on tason leveys (ft)
G_a	on liukumoduuli levyn leikkausmuodonmuutoksesta ja liittimen liukumasta (kips/in.) (Taulukkoarvo tason reunaehdojen mukaan)
Δ_c	on reunapalkin jatkoksen liukuma tähän vaikuttavalla leikkausvoimalla (in.)
x	on reunapalkin liitoksen ja lähimmän tukilinjan välinen etäisyys (ft). (SDPWS 2015, kaava 4.2-1)

Taipuma muodostuu useista eri tekijöistä, jotka aiheutuvat tason taivutusmomentista ja leikkausvoimasta. Yhtälön 36 kaksi ensimmäistä termiä perustuvat Timoshenko-palkkiteoriaan, jossa huomioidaan sekä taivutusmomentista että leikkausvoimasta aiheutuva muodonmuutos. Ensimmäinen termi $\frac{5vL^3}{8EAW}$ on taivutusmomentista aiheutuva taipuma, jonka sisältö on identtinen kaavan 28 kanssa (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.6S). Toinen termi $\frac{0,25vL}{1000G_a}$ on leikkausvoimasta aiheutuva taipuma, joka sisältää sekä levyn leikkausmuodonmuutoksen että levyn kiinnitysliittimien liukuman vaikutuksen. Nimittäjässä esiintyvä kerroin 1000 on yksikkömuunnos, joka aiheutuu Yhdysvalloissa käytössä olevista yksikköjärjestelmistä. (1 kip = 1000 lb = 4448,2216 N) Kolmas termi $\frac{\Sigma(\Delta_c x)}{2W}$ on reunapalkkien liitoksien liukumista aiheutuva tason taipuma. Tason kokonaistaipuma määritetään näiden osataipumien summana.

Kaava 36 on käyttökelpoinen, mikäli levyjen kiinnitysliittiminä käytetään nauloja tai ruuveja. Mikäli liittiminä käytetään hakasia, määritetään tason kokonaistaipuma Δ (in.) kaavalla

$$\Delta = \frac{5vL^3}{8EAb} + \frac{vL}{4G_t} + 0,188Le_n + \frac{\Sigma(\Delta_c x)}{2b}, \quad (37)$$

missä

b	on tason leveys (ft)
G_t	on levyn liukumoduuli (lb/in.)
e_n	on hakasen liukuma (in.)
X	on reunapalkin liitoksen ja lähimmän tukilinjan välinen etäisyys (ft). (2015 International Building Code 2014, kaava 23-1)

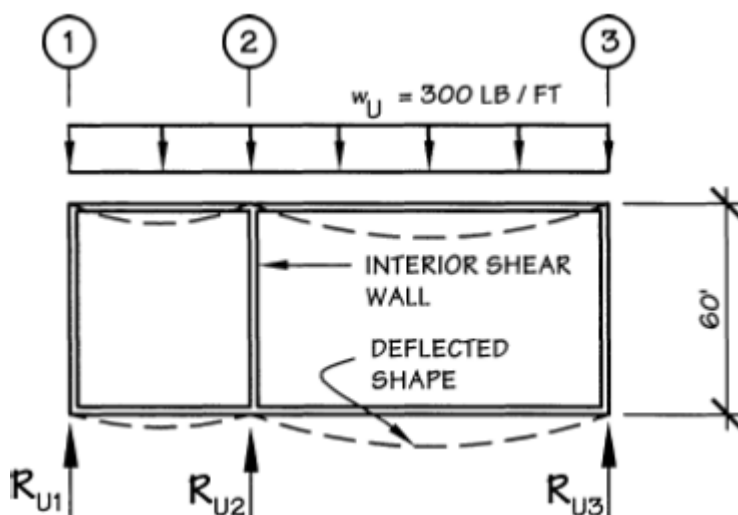
Hakasille on taulukoitu liukumien suuruudet lähteen taulukkoon 2305.2(1). Yhtälön 37 sisältö on osittain sama kuin kaavassa 36. Erona on levyn leikkausmuodonmuutoksen $\frac{vL}{4G_t}$ ja levyn kiinnitysliittimien liukuman vaikutuksen $0,188Le_n$ huomioiminen omilla osatekijöillään. Mikäli suunnittelussa käytetään SI-yksiköitä, muunnetaan kaava 37 muotoon

$$\Delta = \frac{0,052vL^3}{EAb} + \frac{vL}{4G_t} + \frac{Le_n}{1627} + \frac{\Sigma(\Delta_c X)}{2b}, \quad (38)$$

jolloin siirtymän yksikkönä on millimetri. (2015 International Building Code 2014, kaava 23-1)

Tekijät toteavat, että raja-arvoa tason taipuman suuruudelle ei ole, minkä vuoksi rakenteen toimivuuden arviointi jää suunnittelijan vastuulle. Lisähuomiona mainitaan, että taipuman määrittämisestä huolimatta levyjäykistystason mittasuhteiden tulee täyttää taulukon 2 mukaiset raja-arvot. (Breyer et al. 2016)

Useissa asuinrakennuksissa on jäykistäviä väliseiniä (interior shear wall), jotka tukevat levyjäykistystasoa. Yleinen tapa on jakaa taso osiin näiden seinälinjojen mukaan, jolloin tasot voidaan suunnitella yksiaukkoisina. Tällöin jokainen taso tulee tarkastella erikseen ja rakenneosat suunnitella tässä vaikuttaville voimasuureille. Tekijät huomauttavat, että mikäli jäykistävän väliseinän molemmilla puolilla on itsenäisesti toimiva jäykistystaso, tulee väliseinä mitoittaa tasoilta siirtyvien leikkausvoimien summalle. Muutoin yksittäisen tason mitoitusperiaatteet ovat samat kuin koko rakennuksen kattavan tason tapauksessa. Kuvassa 21 on esitetty yksiaukkoisina toteutetut levyjäykistystasot väliseinällisessä rakennuksessa. (Breyer et al. 2016)



Kuva 21. Yksiaukkoiset levyjäykistystasot väliseinällisessä rakennuksessa (Breyer et al. 2016, kuva 9.17a)

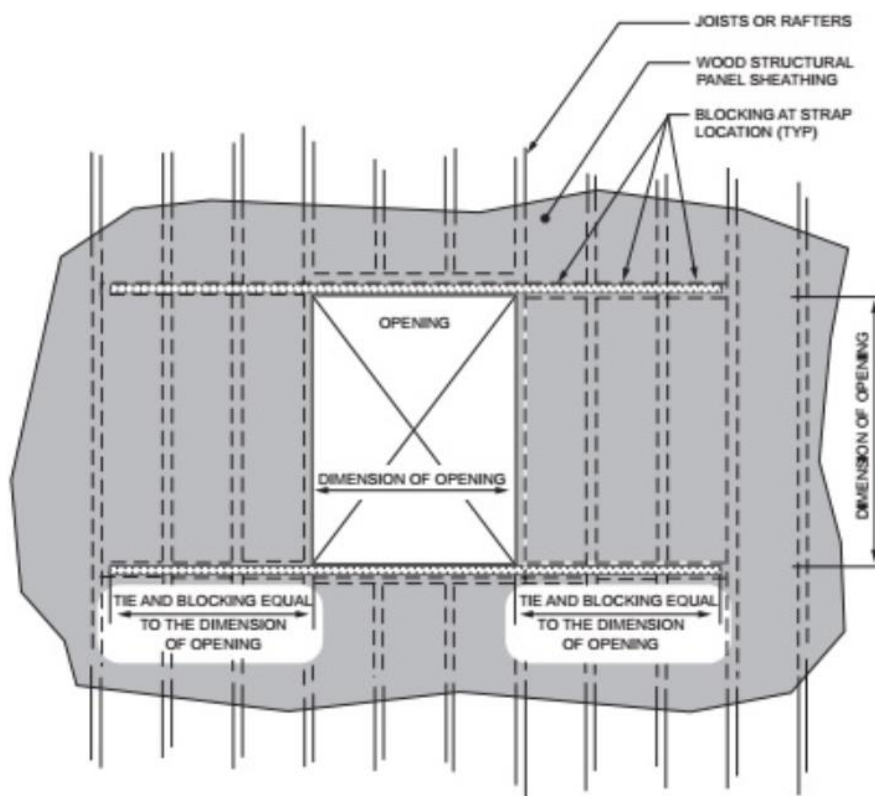
Julkaisussa sivutaan aukotuksien vaikutuksia tason rakenneosien suunnittelussa. Standardi ASCE/SEI 7-16 määrittää luvussa 12.3 rakenteille epäsäännöllisyystupaukset (irregularities), joiden mukaan rakenteiden suunnittelutehtävät luokitellaan. Luokkien mukaan määritetään lisäsuunnittelutarpeet, joilla huomioidaan mm. epäsymmetrisyyksien ja -jatkuvuuden aiheuttamat rasitukset. Standardin ASCE/SEI 7-16 taulukossa 12.3-1 luokitellaan rakenteiden vaakasuuntaiset epäsäännöllisyystupaukset. Rakennetyyppi 3 koskee epäjatkovaa levyjäykistystasoa. Määritelmän mukaan taso luokitellaan epäjatkovaksi, mikäli tasossa on äkillinen alueellinen jäykkyysero, kuten aukko, jonka pinta-ala on yli 50 % koko tason pinta-alasta. Standardi määrää käyttämään tässä tapauksessa korotettuja kuormituksia tietyille tason rakenneosille. Esimerkiksi tason liitoksissa jäykistäviin pystyrakenteisiin voimia tulee kasvattaa 25 %. (ASCE/SEI 7-16 2017)

Tason muiden rakenneosien huomioimisen lisäksi aukon reunat tulee vahvistaa riittävän kestäväillä rakenteilla. Aukon reunoilla olevat vahvistukset toimivat kuten reuna- ja päätypalkit, siirtäen taivutus- ja leikkausrasitukset aukon ohi. (Breyer et al. 2016) Tekijät viittaavat aukotuksien vaikutuksissa testiraporttiin (Research Report 138 – Plywood Diaphragms 2000). Kuormituskokeita on suoritettu useille levyjäykistystasaille, joista kahteen on sijoitettu aukkoja. Ensimmäiseen aukolliseen tasoon oli sijoitettu kaksi pienempää aukkoa (4 ft x 4 ft), joiden reunat olivat vahvistamattomia. (1 ft = 0,3048 m) Toiseen tasoon oli sijoitettu kaksi suurempaa aukkoa (8 ft x 8 ft), joiden reunoilla olevan kiinnitysrungon dimensioita ja levyjen kiinnityслиittimien määrää oli kasvatettu. (Research Report 138 – Plywood Diaphragms 2000)

Raportin mukaan ensimmäisen tason murtumistapa oli aukon kulmiin aiheutuvien puristusvoimien aiheuttama levyjen lommahdus. Testituloksen mukaan pienten aukkojen kohdalla aukon reunoilla olevan kiinnitysrungon vahvistaminen on yleensä riittävä toimenpide, sillä palkeissa vaikuttavat voimat eivät kasva merkittävästi. Palkkien kestävyys-

lisäksi tulee varmistaa, että vahvistusrunko ylittää aukon kulmista toiseen jatkuvana. Toisen tason murtumistapana oli vetovoiman aiheuttama kiinnitysrungon repeytyminen aukon kulmassa. Raportissa todetaan, että suurien aukkojen kulmissa liitoksilla tulee olla riittävä vetokestävyys. Lisäksi todetaan, että testitulokset tukevat teoriaa, jonka mukaan aukollinen levyjäykistystaso toimii kuten Vierendeel-ristikko. (Guidelines for the Design of Horizontal Wood Diaphragms 1981, s. 13) Aukollisten rakenneosien voimasuureiden määrittämisessä raportti viittaa samaan lähteeseen. (Research Report 138 – Plywood Diaphragms 2000)

Kirjan lähteenä oleva International Building Code sisältää lisätietoa aukkojen reunavahvistuksista. Tämän mukaan aukkojen reunavahvistuksen tulee ylittää tietyissä seismisen suunnittelun luokissa (B, C, D ja E) jatkuvana aukon leveyden yli kuvan 22 mukaan. Näissä luokissa kaikkien yli 4 jalkaa (1219 mm) leveiden aukkojen reunavahvistuksissa tulee käyttää terässiteitä. Terässiteiden minimipaksuudeksi määritetään 0,058 tuumaa (1,47 mm), minimileveydeksi 1,5 tuumaa (38 mm) ja myötölujuudeksi vähintään 33000 psi (227 MPa). Siteet tulee kiinnittää valmistajan ohjeiden mukaisesti, mutta vähintään kahdeksalla 16d naulalla (pituus 89 mm) rungon molemmin puolin. (2015 International Building Code 2014)



Kuva 22. Aukon reunavahvistuksen jatkuvuus (2015 International Building Code 2014, kuva 2308.4.4.1(1))

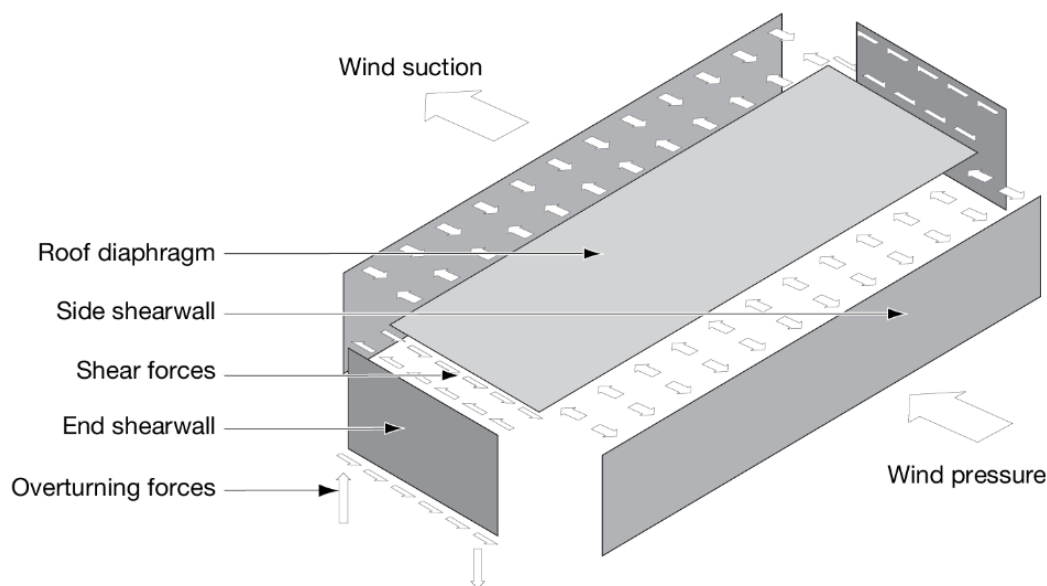
Suunnitteluohje on kattavuudestaan huolimatta puutteellinen tason mitoittamisen kannalta. Tason kestävyysmitoitukset perustuvat taulukoituihin kestävyysarvoihin, yhtälöitä

kestävyyden määrittämiseen mielivaltaisissa kiinnitystapauksissa ei anneta. Suunnittelijan vastuulle jätetään taulukoiden oikea tulkinta tapauksissa, joissa käytettävä tasotyyppi ei ole taulukkoarvojen mukainen. Tämä mahdollistaa epävarmalle puolelle valitut kestävyysarvot, mikäli suunnittelija ei ole täysin varma taulukoiden toiminnasta.

2.5 Wood design manual 2015, Kanada

Wood Design Manual 2015 on puurakenteiden suunnitteluohje, jonka on tuottanut Canadian Wood Council. Ohje perustuu Kanadan viimeisimpiin rakennusmääräyksiin (National Building Code of Canada (2015)) ja standardiin CSA Standard O86-14 Engineering Design in Wood. Julkaisun tavoitteena on helpottaa puurakenteiden tehokasta, taloudellista ja turvallista suunnittelua, sekä toteutusta. Suunnitteluohjeeseen on koottu ytimekkäässä muodossa kattavat tiedot puurakennuksien rakenneosien ja -järjestelmien suunnitteluun.

Suunnitteluohjeen luku 8 käsittelee levyjäykistysseiniä ja -tasoja (Shearwalls and Diaphragms). Luvun alussa määritetään rakenteiden toiminnan perusteet. Levyjäykistysrakenteet jaetaan pystysuuntaisiin jäykistysseiniin ja vaakasuuntaisiin jäykistystasoihin. Jäykistysrakenteita kuormittavat rakennuksen vaakasuuntaiset kuormat, kuten tuuli ja maanjäristykset. Jäykistysrakennekokonaisuuden tehtävänä on siirtää nämä kuormat perustuksille. Kuvassa 23 on esitetty laatikkomaisen rakennuksen tyypilliset levyjäykistysrakenteet ja näiden väliset voimasuureet. (Wood Design Manual 2015, s. 434)



Kuva 23. Kuormien jakaantuminen jäykistysrakenteille (Wood Design Manual 2015, kuva 8.1)

Tuulikuormaa vasten kohtisuorassa suunnassa olevien seinärakenteiden oletetaan siirtävän puolet tähän vaikuttavasta tuulikuormasta perustuksille ja puolet vaakasuuntaiselle

levyjäykistystasolle, joka kuvassa 23 on yläpohjarakenne (roof diaphragm). Levyjäykistystaso siirtää kuormat tukilinjoina toimiville päätyseinille (end shearwall). Päätyseinien oletetaan toimivan perustuksiin kiinnitettynä ulokepalkkeina, jotka siirtävät kuorman perustuksille. (Wood Design Manual 2015, s. 435)

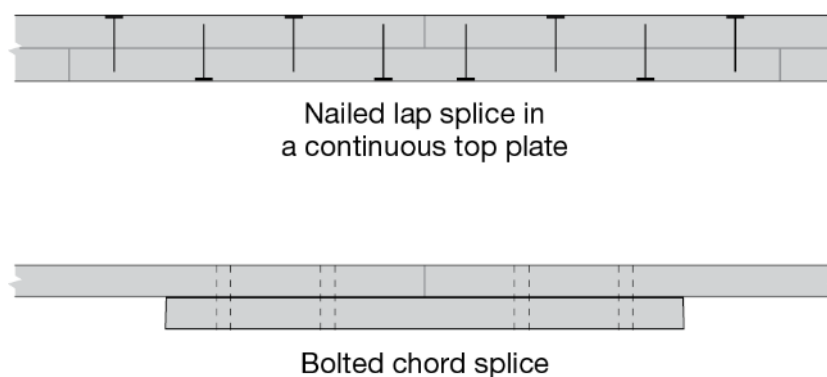
Suunnitteluohjeen mukaan levyjäykistystaso voidaan luokitella jäykäksi, osittain jäykäksi tai joustavaksi tasoksi. Tason rakennemallivalinta on riippuvainen suhteellisesta jäykkyydestään verrattuna maanjäristyskuormien vastaisiin rakenteisiin (Seismic Force Resisting System, SFRS). Ohje viittaa rakennemallin määrittämisessä standardiin ASCE 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Standardin uusimman version ASCE/SEI 41-17 mukaan levyjäykistystaso luokitellaan joustavaksi, jos tason taipuman maksimiarvo on enemmän kuin kaksinkertainen verrattuna alemman kerroksen maanjäristyskuormien vastaisen rakenteen siirtymään. Mikäli tason suurin taipuma on alle puolet tästä arvosta, luokitellaan rakenne jäykäksi tasoksi. Tasot, joiden taipuma on näiden raja-arvojen välillä, luokitellaan osittain jäykiksi tasoiksi. (ASCE/SEI 41-17, s. 66-67) Edellisen rakennemallimääritelmän lisäksi standardi sallii tason määrittämisen joustavaksi standardin ASCE/SEI 7-16 kohdan 12.3.1.1 mukaan, mikä on esitetty tämän työn luvussa 2.4. (Wood Design Manual 2015, s. 442)

Tason rakennemallivalinta vaikuttaa tämän siirtämiin voimasuureisiin. Oletus joustavuudesta yksinkertaistaa suunnittelua ja sallii vaakasuuntaisten voimien jakamisen näiden vastaisille rakenneosille vaikutusalojensa mukaan. Mikäli jäykistystaso oletetaan jäykäksi, jakaantuvat voimat rakenneosille näiden suhteellisten jäykkyyksien mukaan, huomioiden myös rakenteen etäisyyden jäykkyykeskiöstä. Levyjäykistystason jäykkyyden arviointi voi olla haastavaa muiden rakenneosien ja pintarakenteiden jäykistävän vaikutuksen vuoksi. Mikäli jäykkyyttä ei voida määrittää tarkasti, on suositeltavaa suunnitella jäykistysrakenteet molemmilla jäykkyysoletuksilla, käyttäen rakenneosien lopullisessa mitoituksessa määräävintä kuormitustapausta. (Wood Design Manual 2015, s. 442)

Tason suunnittelussa hyödynnetään tämän analogiaa I-palkkiin, joka tukeutuu pystyjäykisteisiin. Yksittäisistä jäykistyslevyistä muodostuva levykenttä toimii palkin uumana ja tason reunoilla olevat reunapalkit laippoina. Kuvassa 24 on esitetty levyjäykistystason vapaakappalekuva, jossa on eritelty tason rakenneosat ja näiden väliset voimasuureet. (Wood Design Manual 2015, s. 435)

P_f	on reunapalkissa vaikuttavan puristusvoiman maksimiarvo (kN)
T_f	on reunapalkissa vaikuttavan vetovoiman maksimiarvo (kN)
M_f	on tasossa vaikuttavan taivutusmomentin maksimiarvo (kNm)
h	on reunapalkkien keskipisteiden välinen etäisyys (m). (Wood Design Manual 2015, s. 438)

Yksiaukkoisen levyjäykistystason tapauksessa suurin taivutusmomentti vaikuttaa tason jännevälin keskellä. Ohje huomauttaa, että palkin mahdolliset jatkokset tulee suunnitella siten, että liitos kestää palkissa vaikuttavan normaalivoiman. Kuvassa 25 on esitetty kaksi jatkoksen toteutustapaa, joissa on käytetty naula- ja pulttiliitoksia.

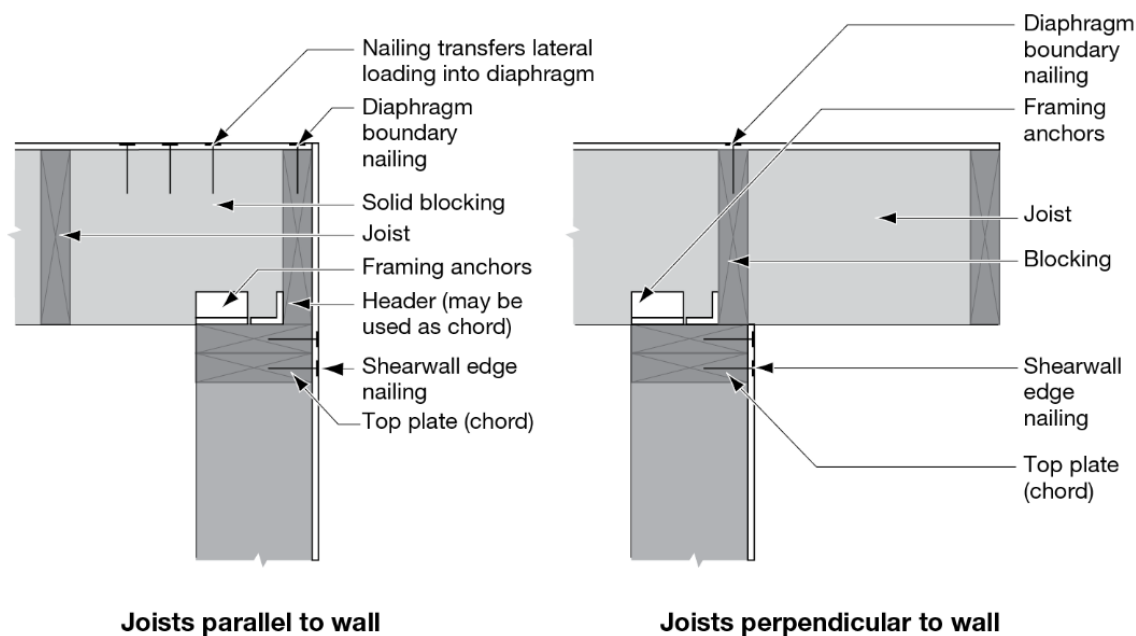


Kuva 25. Reunapalkin jatkoksien toteutusesimerkit (Wood Design Manual 2015, kuva 8.3)

Levykentässä vaikuttava leikkausvoima siirretään levykentän päätyihin kiinnitysrunгон reunimmaisille runkopuille (strut), joiden tulee kestää leikkausvoimasta aiheutuvat rasitukset. Rungossa vaikuttava voima siirretään jäykistäville päätyseinille levyjen kiinnitysrunгон ja seinän välisellä liitoksella. Ohje huomauttaa, että rakennuksen kuormitus suunnan muuttuessa myös jäykistystason rakenneosien tehtävät muuttuvat. Tällöin reunapalkit ja tason tukilinjat vaihtavat paikkoja, jolloin myös näissä vaikuttavat voimasuureet muuttuvat. Tästä syystä kuormitustapaukset tulee tarkastella erikseen ja rakenneosat suunnitella määräävässä tapauksessa. (Wood Design Manual 2015, s. 440)

Suunnitteluohje sisältää yleisen ohjeistuksen levyjäykistysrakenteiden liitoksista puurunkoisissa rakennuksissa. Lähtökohta yksittäisen levyjäykistysrakenteen toteutukselle on sen toimiminen yksittäisistä rakenneosista muodostuvana rakennekokonaisuutena. Rakenneosien välisillä liitoksilla tulee olla riittävä kestävyys tämän ehdon toteuttamiseksi. (Wood Design Manual 2015, s. 440) Yksittäisten levyjäykistysrakenteiden välisillä liitoksilla muodostetaan rakennuksen jäykistyskokonaisuus. Näillä liitoksilla tulee olla riittävä kestävyys ja kyky siirtää kuormitukset luotettavasti jäykistysrakenneosalta toiselle.

Rakennuksen seinärakennetta kuormittava vaakavoima siirretään levyjäykistystasolle näiden välisen liitoksen kautta, jonka yksityiskohdat riippuvat levykentän rungon suunnasta seinärakenteeseen nähden. Kuvassa 26 on esitetty rakenneleikkaukset liitoksista tapauksissa, joissa levyjäykistystason kantava runko on seinän suuntaisesti (joists parallel to wall) ja kohtisuorassa seinään nähden (joists perpendicular to wall).



Kuva 26. Levyjäykistystason ja sivuseinän välisen liitoksen rakenneleikkaukset
(Wood Design Manual 2015, kuva 8.4)

Kuvan 26 rakenneleikkauksissa seinärakenteen yläjuoksu (top plate) on naulattu seinän pystyrunkoon, joka siirtää seinään vaikuttavan vaakakuorman levyjäykistysrakenteen kiinnitysrunkoon. Kuorma siirretään seinään vaikuttavan vaakavoiman suuntaisille runkopuille, jotka tasorakenteen kantavuussuunnasta riippuen voivat olla kantavia palkkeja (joists) tai näiden välisiä tukipalkkeja (blocking). Yläjuoksun ja levyjen kiinnitysrungon välinen liitos voidaan toteuttaa vinonaulaamalla tai kiinnitysankkureilla (framing anchor). Levykentän kiinnitysrungolta voimat siirretään yksittäisille levyille näiden välisien kiinnitysliittimien välityksellä. Jäykistystason reunapalkit ja päädyn tukilinjat tulee liittää toisiinsa tason nurkissa. Mikäli rakenneosina käytetään seinärunkojen yläjuoksuja, voidaan liitos toteuttaa limittämällä ja naulaamalla. Vaihtoehtoisesti liitoksessa voidaan käyttää esimerkiksi teräslevyjä ja pultteja. (Wood Design Manual 2015, s. 440)

Vaakasuuntaisten kuormien lisäksi jäykistysrakenteiden suunnittelussa tulee huomioida mahdolliset vääntörasitukset. Vääntöä aiheutuu kuormien epäkeskisyyksistä jäykkyys- ja massakeskiöön verrattuna, sekä onnettomuuskuormista. Ohje viittaa väännön vaikutusten määrittämisessä Kanadan kansalliseen suunnittelukoodiin (National Building Code of Canada), jossa on annettu menettelyohjeet sekä jäykille että joustaville tasoille. Jäykän tason suunnittelussa tulee käyttää maanjäristyksistä aiheutuvalle vaakavoimalle epäkes-

kisyyden suuruutena luonnollisen epäkeskisyyden (natural eccentricity) ja tason dimensioista määritetyn pituuden summaa (10% tason kuormaa kohtisuorassa suunnassa olevasta pituudesta). Tällä epäkeskisyydellä huomioidaan sekä onnettomuuskuormista että luonnollisista ja dynaamisista kuormista aiheutuva vääntörasitus. Ohjeistus joustaville tasoille löytyy kansallisen suunnittelukoodin selostuksesta (Structural Commentaries to the National Building Code of Canada). Joustavilla tasoilla onnettomuuskuormista aiheutuva vääntö huomioidaan käyttämällä epäkeskisyyden suuruutena 5% tason kuormaa kohtisuorassa suunnassa olevasta pituudesta. Tuulikuormasta aiheutuvat vääntörasitukset huomioidaan käyttämällä suunnittelukoodin mukaisia tuulikuorman määräytymisperusteita. (Wood Design Manual 2015, s. 443)

Läpivientien ja aukotuksien vaikutus tulee huomioida tason yksityiskohtien suunnittelussa. Aukkojen reunat tulee vahvistaa siten, että tasossa vaikuttavat voimat siirtyvät aukon ohi toimivaa reittiä pitkin. Voimia siirtävät rakenneosat ja näiden väliset liitokset tulee mitoittaa kestävänsä näissä vaikuttavat kuormat. (Wood Design Manual 2015, s. 443)

Suunnitteluohje sisältää mitoitusaulukot yleisesti käytössä oleville jäykistystasotyypeille. Taulukot sisältävät materiaali- ja liitinkohtaiset leikkaus- ja lommahduskestävyyden arvot tason pituusyksikköä kohti. Taulukkoihin on koottu yleisimmät levypaksuudet, liittimien koot ja liitinjat, joiden mukaan kestäväyden arvot on mitoitettu. Taulukkoarvojen käyttö sellaisenaan edellyttää määritettyjen reunaehtojen toteutumista, jotka on esitetty suunnitteluohjeessa seuraavana viiden kohdan tarkistuslistana:

- 1) Kuorman aikaluokan tulee olla lyhytkestoinen (K_D)
- 2) Käyttöolosuhteen tulee olla kuiva (K_{SF}) ja käytettävän puurunkomateriaalin kuivattu ennen työstämistä ≤ 19 % kosteuspitoisuuteen (K_S)
- 3) Materiaaleissa ei käytetä lujuutta heikentäviä kemikaaleja (K_T)
- 4) Liitinrivejä on yksi ja puurungon paksuus on 64 mm (J_f)
- 5) Levyjen kiinnitystapa on suljettu, eli liitinrivit kulkevat levyn jokaisella reunalla (J_{ud}).

Mikäli jokin reunaehdoista ei toteudu, tulee kyseistä tekijää kompensoida ehdon suluissa mainitulla lisäkertoimella. Reunaehtojen lisäksi taulukkojen loppuun on kirjattu lisähuomioita, jotka tulee ottaa suunnittelussa huomioon. Esimerkki suunnitteluohjeen sisältämistä taulukoista on esitetty liitteessä 5. (Wood Design Manual 2015)

Mitoitusaulukoissa esitetty leikkauskestävyyden mitoitusarvo V_{rd} on määritetty valitun jäykistysmateriaalin ja tämän dimensioiden mukaan. Mikäli jäykistysmateriaalina käytetään rakennuslevyn sijasta sahatavaraa, määritetään leikkauskestävyys V_{rd} (kN/m) kaavalla

$$V_{rd} = \varphi J_D J_S J_f J_{ud} V_d, \quad (40)$$

missä

φ	on lujuuskerroin, jonka arvo on 0,8 (-)
J_D	on levyjäykistystasoissa ja -seinissä käytettävä kerroin liittimille. (-) Nau- laliitokselle kertoimen arvo on 1,3
J_s	on liitinjako s mukaan valittava kerroin. (-) Kun liitinjako $s \geq 150 \text{ mm}$ on $J_s = 1,0$, kun liitinjako $50 \text{ mm} \leq s \leq 150 \text{ mm}$ on $J_s = 1 - \left(\frac{150-s}{150}\right)^{4,2}$
J_f	on kiinnikerivikerroin suljetuille levykentille, joka määritetään liitteen 6 taulukosta. (-) Oletuksena taulukoissa on käytetty arvoa 1.
J_{ud}	on lujuuskerroin avoimille levykentille, joka määritetään liitteen 7 taulu- kosta. (-) Oletuksena taulukoissa on käytetty arvoa 1.
V_d	on käytettävän levytyksen (sahatavara, vaneri tai OSB-levy) leikkauskestä- vyys pituusyksikköä kohden (kN/m). (Wood Design Manual 2015, s. 444)

Valitun levytyypin leikkauskestävyys V_d määritetään kaavalla

$$V_d = N_u/s, \quad (41)$$

missä N_u (N) on levyn ja kiinnitysrunгон välisen liitoksen yksittäisen liittimen leikkaus-
kestävyys. (Wood Design Manual 2015, s. 444) Leikkauskestävyyden suuruus määrite-
tään kaavalla

$$N_u = n_u(K_D K_{SF} K_T), \quad (42)$$

missä

n_u	on yksittäisen liittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo standardin CSA O86 mukaan (N)
K_D	on kuormitusajan pituudesta riippuva kerroin, jonka arvona on taulukoissa käytetty $K_D = 1,15$ (lyhytaikainen kuormitus kuten tuuli- tai maanjäristys- kuorma). (-) Mikäli kuormitus on pysyvä, tulee taulukon arvo kertoa luvulla 0,565 ja standardikuormien tapauksessa luvulla 0,870.
K_{SF}	on käyttöolosuhteista riippuva kerroin liitokselle, jonka arvona on taulu- koissa käytetty $K_{SF} = 1,0$ (käytettävä sahatavara on kuivattu ennen työstä- mistä siten, että materiaalin kosteuspitoisuus on $\leq 19 \%$ ja käyttökohteen olosuhteet ovat kuivat). (-) Mikäli käytetään kuivaamatonta sahatavara kui- vissa käyttöolosuhteissa, tulee taulukon arvo kertoa luvulla 0,8. Märisä käyttöolosuhteissa taulukon arvo tulee sahatavaran kuivuudesta riippumatta kertoa luvulla 0,67.

K_T on materiaalin käsittelykerroin, jonka arvona on taulukoissa käytetty $K_T = 1,0$ (lujuutta alentavia kemikaalisia käsittelyjä ei ole tehty). (-) (Wood Design Manual 2015, s. 444)

Käytettäessä levytyksenä rakennuslevyjä, kuten vaneria tai OSB-levyä, tulee levyn leikkauskestävyyden lisäksi tehdä lommahdustarkastelu. Rakenteen mitoittavana kestävyysnä tulee käyttää näistä pienempää arvoa. Lommahduskestävyys pituusyksikköä kohden V_{rd} (kN/m) määritetään kaavalla

$$V_{rd} = \varphi K_D K_S K_T V_{pb}, \quad (43)$$

missä

K_S on käyttötapakerroin puurakennuslevyille, jonka arvona on taulukoissa käytetty $K_S = 1,0$ (kuivat olosuhteet). (-) Käytettäessä vaneria märissä olosuhteissa, tulee käyttää lisäkerrointa 0,8. Suunnitteluohje huomauttaa, että OSB-levyä tulee käyttää vain kuivissa olosuhteissa.

V_{pb} on levyn lommahduskestävyys pituusyksikköä kohden kriittisimmässä levytapauksessa. (kN/m) (Wood Design Manual 2015, s. 444)

Levyn lommahduskestävyyden ominaisarvo V_{pb} määritetään kaavalla

$$V_{pb} = K_{pb} \frac{\pi^2 t^2}{3000b} (B_{a,0} B_{a,90}^3)^{\frac{1}{4}}, \quad (44)$$

missä

K_{pb} on lommahduskerroin, joka määritetään kaavalla 45 (-)

t on levyn paksuus (mm)

b on levyn lyhyemmän sivun pituus (mm)

$B_{a,0}$ on levyn aksiaali jäykkyys 0° suunnassa standardin CSA O86 mukaan (N/mm)

$B_{a,90}$ on levyn aksiaali jäykkyys 90° suunnassa standardin CSA O86 mukaan. (N/mm) (Wood Design Manual 2015, s. 445)

Levyn lommahduskerroin K_{pb} määritetään kaavalla

$$K_{pb} = 1,7(\eta + 1) \exp\left(\frac{-\alpha}{0,05\eta + 0,75}\right) + 0,5\eta + 0,8, \quad (45)$$

missä η ja α ovat kertoimia, jotka määritetään kaavoilla

$$\eta = \frac{2B_v}{\sqrt{B_{a,0} \cdot B_{a,90}}} \quad (46)$$

ja

$$\alpha = \frac{a}{b} \left(\frac{B_{a,90}}{B_{a,0}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (47)$$

missä

a on levyn pidemmän sivun pituus (mm)
 B_v on levyn liukumoduuli (shear-through-thickness rigidity) standardin CSA O86 mukaan. (N/mm) (Wood Design Manual 2015, s. 445)

Taulukkoihin on koottu Kanadan yleisimpien vanerituotteiden lommahduslujuudet. Taulukoissa on oletettu, että levyn koko on 2440 mm x 1220 mm, eikä levyn keskellä olevia tukia ole huomioitu laskettuihin arvoihin. (Wood Design Manual 2015, s. 445)

Suunnitteluohje sisältää yhtälön, jolla voidaan arvioida tason taipumaa jännevälin keskellä. Taso tulee olla nivelellisesti tuettu ja levyjen kiinnitystapojen suljettu. Taipuman suuruutta Δ_d (mm) arvioidaan kaavalla

$$\Delta_d = \frac{5vL^3}{96EAL_D} + \frac{vL}{4B_v} + 0,00061Le_n + \frac{\Sigma(\Delta_c x)}{2L_D}, \quad (48)$$

missä

v on tasossa vaikuttavan leikkausvoiman maksimiarvo pituusyksikköä kohti (N/mm)
 L on tason jänneväli kohtisuorassa tason kuormituksen suuntaan nähden (mm)
 E on tason reunapalkkien kimmomoduuli (MPa)
 A on tason reunapalkkien poikkileikkauspinta-ala (mm²)
 L_D on tason pituus kuormituksen suunnassa (tason leveys) (mm)
 e_n on liittimen liukuma, joka määritetään kaavalla 49 (mm)
 Δ_c on reunapalkin jatkoksen liukuma tähän vaikuttavalla leikkausvoimalla (mm)
 x on reunapalkin liitoksen ja lähimmän tukilinjan välinen etäisyys (mm). (Wood Design Manual 2015, s. 441)

Yhtälöä käytetään Yhdysvalloissa hakaskiinnitetyissä levyjäykistystasoissa, mikä on avattu sisältöineen tämän työn luvussa 2.4 kaavoina 37 ja 38. Liittimen liukumaan e_n vaikuttaa käytettävä puumateriaali ja tämän kuivuus. Käytettäessä kuivaa sahatavaraa (dry lumber), määritetään naulojen liukuma kaavalla

$$e_n = \left(\frac{0,013vs}{d_f^2} \right)^2, \quad (49)$$

Missä d_f on naulan halkaisija (mm). (Wood Design Manual 2015, s. 445) Käytettäessä tuoretta sahatavaraa (green lumber) määritetään liukuma kaavalla 50. (Wood Design Manual 2015, s. 445)

$$e_n = 2x \left(\frac{0,013vs}{d_f^2} \right)^2 \quad (50)$$

Käytettäessä kipsilevyjä ja kuivaa sahatavararunkoa, käytetään liukumalle arvoa $e_n = 0,76 \text{ mm}$. (Wood Design Manual 2015, s. 445)

Suunnitteluohje sisältää osittain samaa ohjeistusta kuin Yhdysvalloissa käytössä oleva Design of Wood Structures. Teoriaosuus on lyhydestään huolimatta kattava, ja huomioi jäykistystason erilaiset jäykkyysoletukset. Ohje sisältää mitoitustaulukot levyjäykistystason kestävyysmäärittämiseen, mutta myös yhtälöt arvojen muokkaukseen tapauskohtaisesti. Puutteena on monimuotoisempien tasojen ja mahdollisten jäykistävien väliseinien sivuutus. Lisäksi tason aukotuksien vahvistukseen ei esitetä konkreettisia menetelmiä.

3. KIMMOTEORIAAN PERUSTUVA SUUNNITTE- LUMENETELMÄ

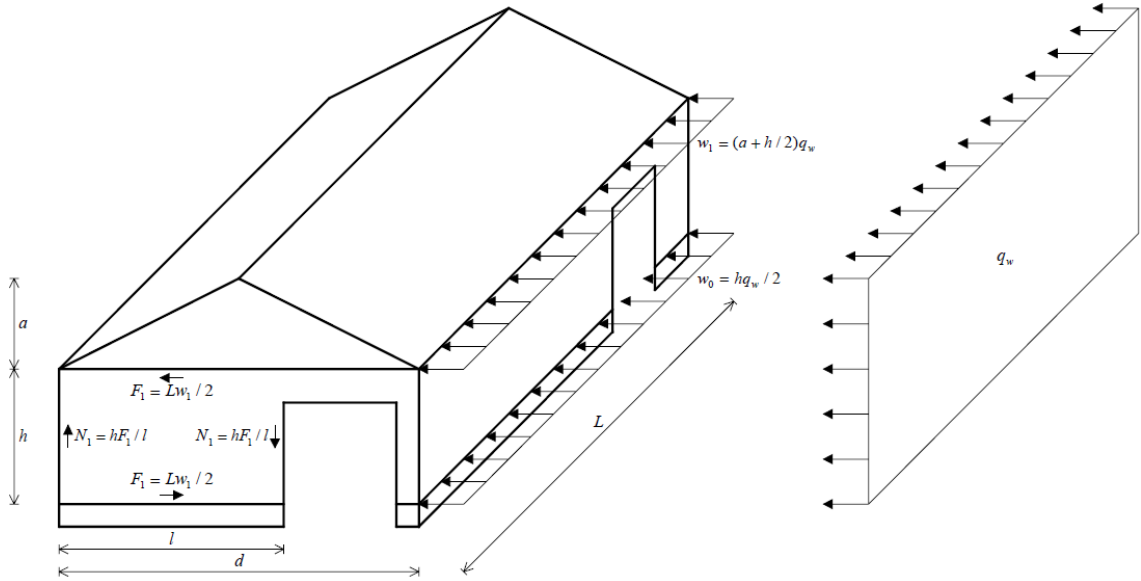
3.1 Levyjäykistuksen suunnittelu

Leskelän vuonna 2005 tekemän lisensiaattityön (Linear elastic method for timber framed ceiling, floor and wall diaphragms) tavoitteena oli kehittää lineaariseen kimmoteoriaan perustuva suunnitteluohje puulevyillä jäykistetyille yläpohja-, välipohja- ja seinärakenteille. Työ sisältää kirjallisuuskatsauksen vuonna 2005 käytössä olleisiin laskentateorioihin, sekä näiden puutteisiin. Leskelä on kehittänyt teorioiden ja näiden puutteiden perusteella suunnitteluohjeen, joka sisältää mitoitusyhtälöt yläpohja-, välipohja- ja seinärakenteiden kuormituskestävyyden ja vaakasuuntaisen siirtymän määrittämiseksi.

Suunnitteluohje sisältää yksityiskohtaiset menettelyohjeet rakennuksen levyjäykistysrakenteiden mitoitukseen. Jäykistysrakenteiden kuormien määrittämisperiaatteet ja liitosdetaljiesimerkit on esitetty yksi- ja monikerroksiselle rakennukselle. Laskentamenetelmät on esitetty sekä vaakasuuntaisille että pystysuuntaisille levyjäykistysrakenteille. Lisäksi ohjeessa on esitetty havainnollistavat laskentaesimerkit yksikerroksisen teollisuusrakennuksen ja monikerroksisen asuinrakennuksen levyjäykistysrakenteille.

Suunnitteluohjeen ensimmäisessä luvussa esitetään jäykistysrakenteiden kuormien jakaantumisperusteet puurakenteisessa teollisuusrakennuksessa ja monikerroksisessa asuinrakennuksessa. Rakennuksien kuormat jaetaan pysty- ja vaakasuuntaisiin voimiin. Ohjeen mukaan pystysuuntaiset voimat muodostuvat rakenteiden omista painoista, lumi-kuormasta ja tuulikuorman pystysuuntaisesta komponentista. Pystysuuntaiset voimat viedään perustuksille kantavien rakenteiden kautta. Vaakasuuntaiset voimat muodostuvat tuulikuorman vaakasuuntaisesta komponentista, jotka viedään jäykistystasojen kautta jäykistysseinille, joilta kuormat siirtyvät perustuksille. (Leskelä 2005)

Ohjeen yksikerroksisen teollisuusrakennuksen jäykistysjärjestelmä muodostuu räystäästasolla olevasta yläpohjan levyjäykistystasosta, sekä pystysuuntaisista jäykistysseinistä. Rakennusta kuormittaa vaakasuuntainen tuulikuorma q_w kuvan 27 mukaan.



Kuva 27. Tuulikuorman jakaantuminen jäykistysrakenteille teollisuusrakennuksessa (Leskelä 2005, kuva 4.1)

Tuulikuorman räystäätason alapuolisen osuuden oletetaan jakautuvan tasan perustustason ja yläpohjan jäykistystason kesken. Räystäätason yläpuolisen osuuden oletetaan välittyvän täysin yläpohjan jäykistystasolle. Tällöin perustustasossa vaikuttava tasainen kuorma w_0 määritetään kaavalla

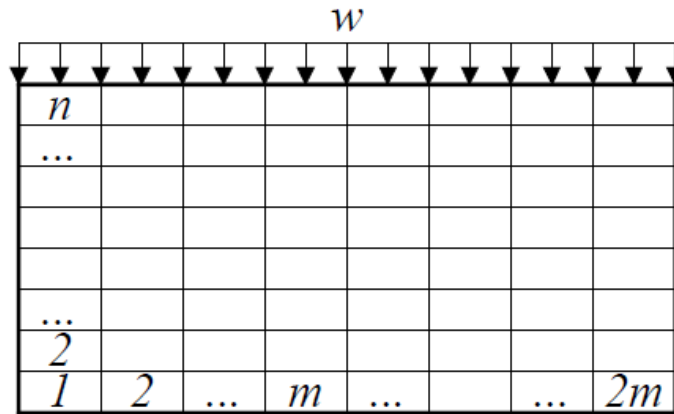
$$w_0 = \frac{h q_w}{2}, \quad (51)$$

missä h on yläpohjan jäykistystason pystysuuntainen etäisyys perustustasosta. (Leskelä 2005, s.33) Yläpohjan jäykistystason tasainen kuorma w_1 määritetään kaavalla

$$w_1 = \left(a + \frac{h}{2}\right) q_w, \quad (52)$$

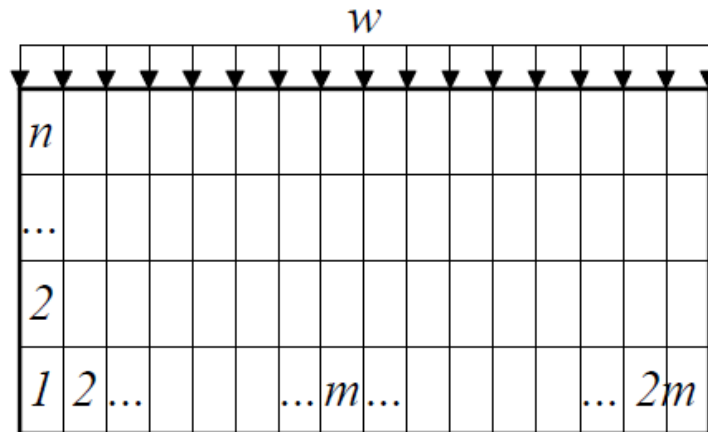
missä a on rakennuksen harjan ja yläpohjan jäykistystason välinen pystysuuntainen etäisyys. (Leskelä 2005, s.33)

Ohjeen monikerroksisen asuinrakennuksen jäykistysjärjestelmä muodostuu räystäätasolla olevasta yläpohjan levyjäykistystasosta, välipohjien jäykistävästä lattiatasosta, sekä pystysuuntaisista jäykistysseinistä. Rakennusta kuormittaa vaakasuuntainen tuulikuorma q_w kuvan 28 mukaan.



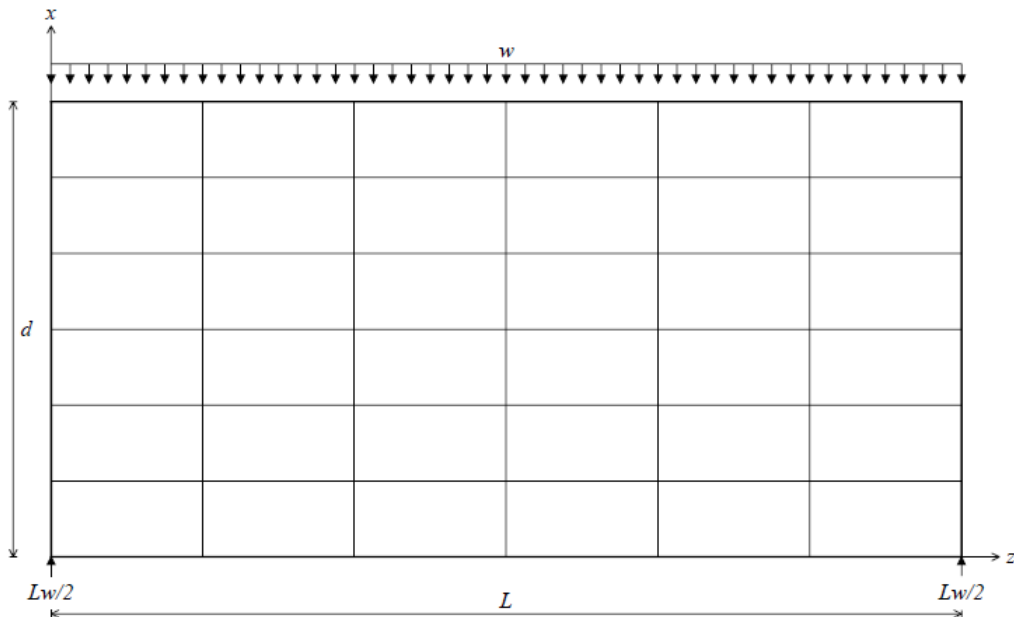
Kuva 29. Levykentän jakautuminen yksittäisiin levyihin kohtisuorassa suunnassa kuormitukseen nähden (Leskelä 2005, kuva 4.15a)

Kuvassa 29 levyt on kiinnitetty kohtisuoraan tason kuormitukseen nähden. Levyt voidaan kiinnittää myös kuorman suuntaisesti kuvan 30 mukaan.



Kuva 30. Levykentän jakautuminen yksittäisiin levyihin kuormituksen suunnassa (Leskelä 2005, kuva 4.15b)

Levyjen kiinnityssuunta vaikuttaa tason voimasuureisiin, jotka esitetään edempänä. Levyjäykistystason rakennemalli on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Levyjäykistystason rakennemalli (Leskelä 2005, kuva 3.10)

Tasoa kuormittaa tasainen kuorma w , josta aiheutuvat taivutus- ja leikkausrasitukset ovat johdettavissa yksiaukkoisen palkin statiikasta. (Leskelä 2005)

Tason taivutusmomentti $M(z)$ määritetään kaavalla

$$M(z) = \frac{(Lz - z^2)w}{2}, \quad (54)$$

missä z on tarkastelupisteen koordinaatti kuvan 31 mukaan. (Leskelä 2005, kaava 3.23)

Taivutusmomentti saa maksimiarvonsa M_{max} kentän jännevälin keskellä kaavan 55 mukaan. (Leskelä 2005, kaava 3.25)

$$M_{max} = M\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{L^2 w}{8} \quad (55)$$

Tason leikkausvoima $V(z)$ määritetään kaavalla

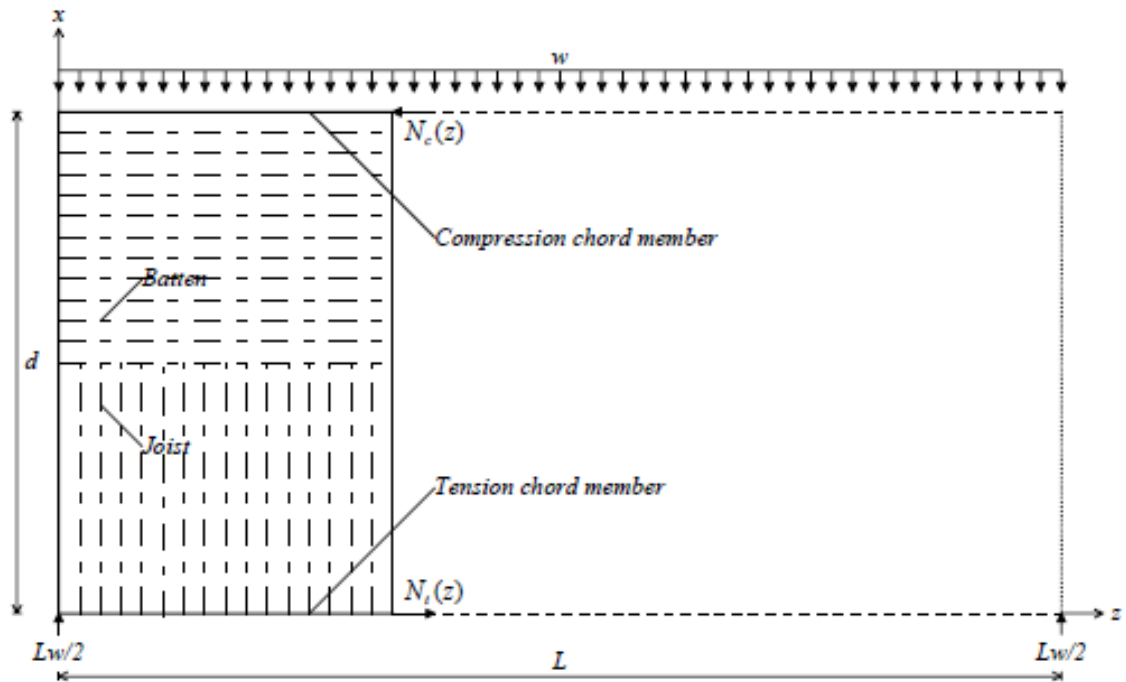
$$V(z) = \frac{(L - 2z)w}{2}, \quad (56)$$

missä z on tarkastelupisteen koordinaatti kuvan 31 mukaan. (Leskelä 2005, kaava 3.24)

Leikkausvoima saa maksimiarvonsa V_{max} kentän päädyissä kaavan 57 mukaan. (Leskelä 2005, kaava 3.26)

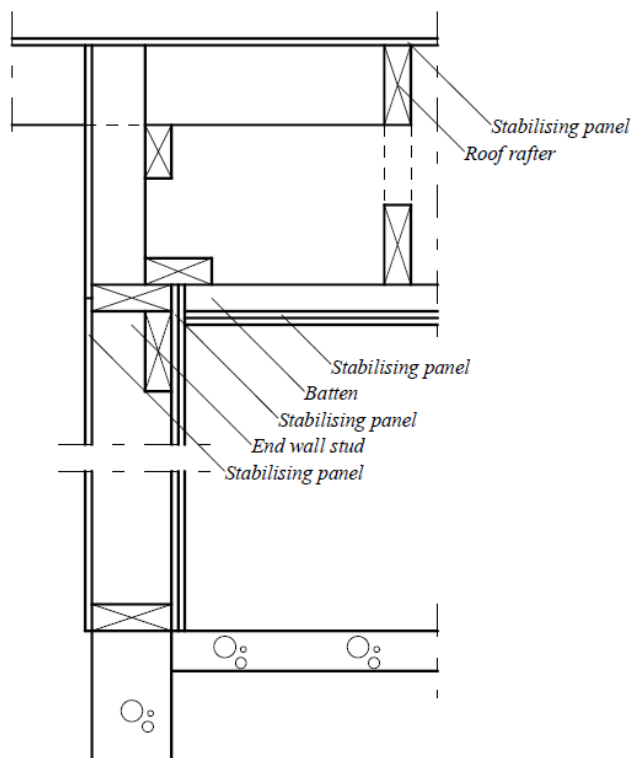
$$V_{max} = V(0) = \frac{Lw}{2} \quad (57)$$

Taivutusmomentti otetaan vastaan tason ylä- ja alareunoilla olevilla reunapalkeilla kuvan 32 mukaan (compression chord member, tension chord member).



Kuva 32. Tason reunapalkkien rasitukset (Leskelä 2005, kuva 3.11)

Leskelän suunnitteluohjeessa reunapalkkeina käytetään tasoa tukevien päätyseinien yläjuoksuja, josta on esitetty esimerkkirakenne kuvassa 33.



Kuva 33. Tason reunapalkin rakenneleikkaus (Leskelä 2005, kuva 4.4)

Kuvan 33 rakenteessa taivutusmomentista aiheutuva normaalivoima siirretään levyjen kiinnitysrungon reunalla oleville koolauspuille (batten), jotka puolestaan siirtävät voimat

välikappaleen kautta seinälinjan yläjuoksulle. Rakennneosien väliset liitokset tulee suunnitella siten, että voima siirtyy luotettavasti palkkina toimivalle rakenneosalle. (Leskelä 2005)

Reunapalkeissa vaikuttavan normaalivoiman suuruus määritetään kaavalla

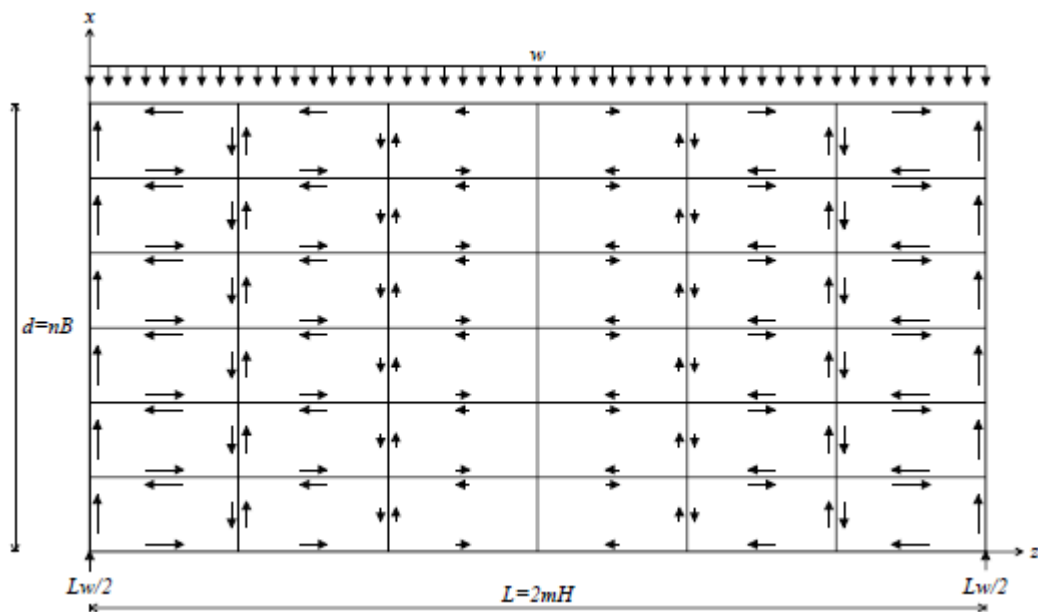
$$N_t(z) = N_c(z) = \frac{M(z)}{d} = \frac{(Lz - z^2)w}{2d}, \quad (58)$$

missä $N_t(z)$ on palkissa vaikuttava vetovoima ja $N_c(z)$ on palkissa vaikuttava puristusvoima. (Leskelä 2005, kaava 3.27) Palkeissa vaikuttava normaalivoima saa suurimman arvonsa taivutusmomentin maksimipisteessä. Yksiaukkoisen tason tapauksessa voiman suuruus määritetään tason jännevälin keskellä kaavalla 59. (Leskelä 2005, kaava 3.28)

$$N_{max} = \frac{M_{max}}{d} = \frac{L^2 w}{8d} \quad (59)$$

Mitoittava reunapalkki mitoitus suureineen määräytyy materiaalivalinnan perusteella. Yläjuoksuna usein käytettävän sahatavaran puristuslujuus on korkeampi kuin vetolujuus, jolloin palkit tulee mitoittaa vetovoimalle $N_t(z)$. (Leskelä 2005)

Leikkausvoima otetaan vastaan yksittäisistä levyistä ja näiden kiinnitysliittimistä muodostuvalla levykentällä. Voima oletetaan vakioksi tarkastelupisteen poikkileikkauksessa tason leveysuunnassa ja symmetriseksi kentän pituussuunnassa kuvan 34 mukaan.



Kuva 34. Leikkausvoimien jakaantuminen levykentässä (Leskelä, kuva 3.12)

Kuvassa 34 yksittäisen levyn leveys on B ja korkeus H . Liittimissä vaikuttava leikkausvoima saa suurimman arvonsa kentän reunimmaisissa levyissä. Voiman suuruus yksittäisessä levyssä $\frac{F}{n}$ määritetään kaavalla

$$\frac{F}{n} = \frac{V_{max}}{n} = \frac{Lw}{2n}, \quad (60)$$

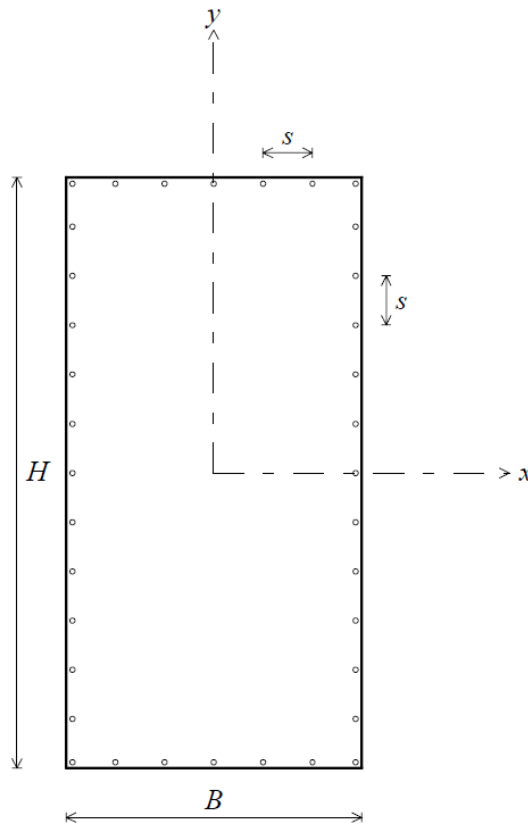
missä n on yksittäisten levyjen lukumäärä levykentän leveyssuunnassa. (Leskelä 2005, kaava 3.29)

Suurin liittimissä vaikuttava leikkausvoima määräytyy levyjen kiinnityssuunnan ja kiinnitystavan mukaan. Levyn kiinnitystapa, eli liittimien sijainnit ja määrät levyssä, huomioidaan kiinnitystapakertoimilla, jotka on johdettu käyttämällä potentiaalienergian minimiperiaatetta. Samat kertoimet toimivat sekä levyseinäjäykistyksessä että vaakasuuntaisessa levyjäykistystasossa. Laskentamenetelmässä käytetään seuraavia oletuksia:

- levyt ovat jäykkiä taivutuksen ja jännityksien suhteen, mutta lineaarisesti kimmoisia leikkauksen suhteen
- rungon rakenneosat ovat jäykkiä ja nivelellisesti kiinnitetty toisiinsa, jolloin näiden muodonmuutoksia ei esiinny
- levyjen ja rungon väliset liittimet käyttäytyvät lineaarisesti kimmoisesti leikkauksessa murtoon saakka
- liittinten väliset etäisyydet ovat jatkuvia rungon eri rakenneosien välillä
- liittinten väliset etäisyydet ja reunaetäisyydet ovat riittävän suuret, jolloin levyn murtumista ei tapahdu
- suoraa kontaktia viereisiin levyihin tai levyjen ja viereisen rakenteen välillä ei esiinny, jolloin levyjä kuormittaa vain liittimistä aiheutuva leikkausvoima
- siirtymät ovat pieniä verrattuna levyn pituuteen ja leveyteen
- levyillä on jäykkyyttä vain tasonsa suunnassa.

Leskelä huomauttaa, että oletus lineaarisesti kimmoisista levyistä ja liittimistä, sekä nivelellisesti toisiinsa kiinnitetyistä jäykistä runkorakenteista on perusteltua käsinlaskentamenetelmässä, mutta muissa tapauksissa tietokoneavusteinen epälineaarinen mallintaminen voi olla tarpeen. (Leskelä 2005, s. 20)

Kertoimien johtamisessa tarkasteltava jäykistyslevy kiinnitysrunkoineen on esitetty kuvassa 35, jossa xy-koordinaatiston origo on asetettu levyn painopisteeseen.



Kuva 35. Kiinnitystapakertoimien johtamisessa käytetty levyn rakennemalli (Leskelä 2005, kuva 3.3)

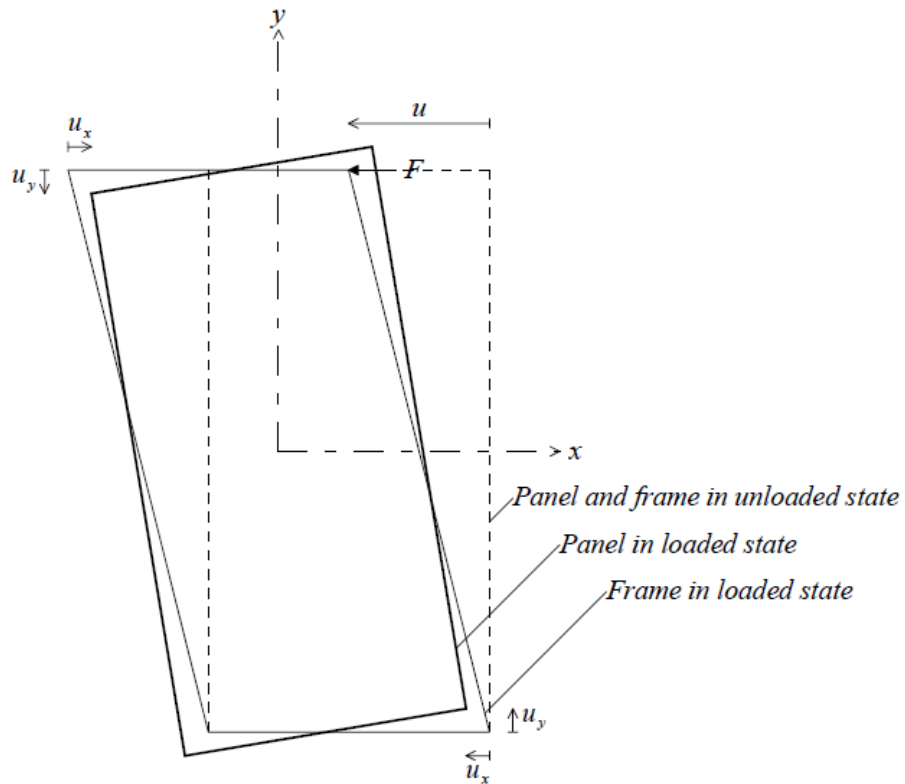
Levyn leveys on B ja korkeus H . Levy on kiinnitetty runkoon kaikilta reunoiltaan liittimillä, joiden jakovälin suuruus on s . Levyn yläreunaa kuormitetaan kuvan 36 mukaan voimalla F , mikä aiheuttaa levyn kiinnitysrungolle vaakasuuntaisen siirtymän u . Kiinnitysrungon osat ovat jäykkiä ja kiinnitetty toisiinsa nivelellisesti, jolloin runkorakenne on joustavampi kuin tähän kiinnitetty jäykistyslevy. Tällöin rungon muodonmuutos on suurempi kuin levyn muodonmuutos. Muodonmuutosten ero edellyttää levyn kiinnityслиittimien liukumaa. Levyn nurkissa olevien kiinnityслиittimien siirtymä pystysuunnassa on u_y ja vaakasuunnassa u_x . Yksittäisen kiinnityслиittimen siirtymä pystysuunnassa u_{yi} määritetään kaavalla

$$u_{yi} = \frac{u_y x_i}{x_{max}}, \quad (61)$$

missä x_i on liittimen sijainnin x-komponentti ja x_{max} on levyn nurkassa olevan liittimen sijainnin x-komponentti. (Leskelä 2005, s. 22) Yksittäisen liittimen siirtymä vaakasuunnassa u_{xi} määritetään kaavalla

$$u_{xi} = \frac{u_x y_i}{y_{max}}, \quad (62)$$

missä y_i on liittimen sijainnin y-komponentti ja y_{max} on levyn nurkassa olevan liittimen sijainnin y-komponentti. (Leskelä 2005, s. 22)



Kuva 36. Tarkasteltavan levyn siirtymä kuormitettuna (Leskelä 2005, kuva 3.4)

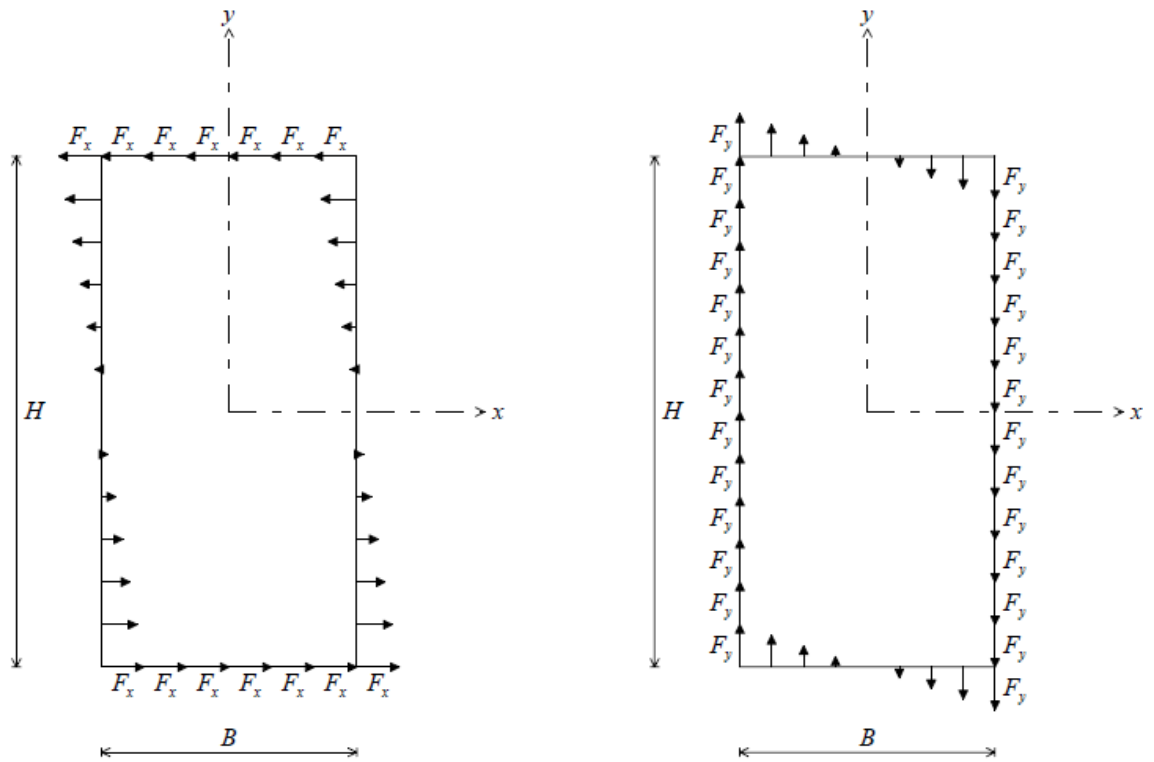
Liittimessä vaikuttava leikkausvoima voidaan määrittää tämän siirtymästä ja siirtymäkerroimesta K . Pystysuuntainen leikkausvoima F_{yi} määritetään kaavalla

$$F_{yi} = Ku_{yi} \quad (63)$$

ja vaakasuuntainen leikkausvoima F_{xi} kaavalla 64. (Leskelä 2005, s.23)

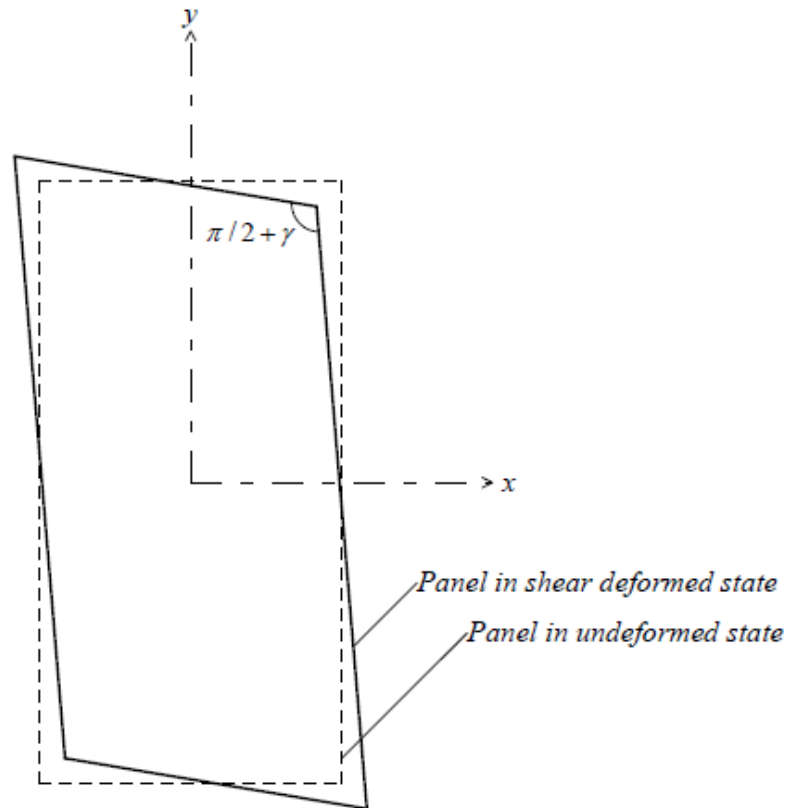
$$F_{xi} = Ku_{xi} \quad (64)$$

Tällöin suurin liittimessä vaikuttava leikkausvoima esiintyy levyn nurkissa. Kuvassa 37 on esitetty levyn liittimissä vaikuttavien leikkausvoimien jakaumat vaaka- ja pystysuunnissa.



Kuva 37. Tarkasteltavan levyn liittimissä vaikuttavien leikkausvoimien jakaumat (Leskelä 2005, kuvat 3.5 ja 3.6)

Kuormitus muuttaa levyn muotoa. Leikkausmuodonmuutosta kuvataan kulmalla γ kuvan 38 mukaan. Tällöin levyn yläreunan siirtymän suuruus on $H \cdot \gamma$.



Kuva 38. Tarkasteltavan levyn leikkausmuodonmuutos (Leskelä 2005, kuva 3.7)

Siirtymien ja leikkausmuodonmuutoksen suuruus voidaan määrittää käyttämällä potenti-
aalienergian minimiperiaatetta. Tarkasteltavan levyn potentiaalienergia U muodostuu
neljästä osatekijästä kaavalla

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4, \quad (65)$$

missä

- U_1 on kiinnitysliittimien siirtymästä aiheutuva sisäinen energia (deformaatio)
- U_2 on levyn yläreunan siirtymästä u aiheutuva ulkoinen energia
- U_3 on levyn leikkausmuodonmuutoksesta γ aiheutuva sisäinen energia
- U_4 on leikkausvoimasta aiheutuvasta levyn yläreunan siirtymästä $H \cdot \gamma$ aiheutuva ulkoinen energia. (Leskelä 2005, kaava 3.6)

Osatekijät määritetään kaavoilla

$$U_1 = \sum_{i=1}^n \frac{Ku_{xi}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{Ku_{yi}^2}{2} = \frac{Ku_x^2}{2y_{max}^2} \sum_{i=1}^n y_i^2 + \frac{Ku_y^2}{2x_{max}^2} \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad (66)$$

$$U_2 = -uF = -\left(2u_x + \frac{2H}{B}u_y\right)F, \quad (67)$$

$$U_3 = \frac{tBHG\gamma^2}{2} \text{ ja} \quad (68)$$

$$U_4 = -H\gamma F, \quad (69)$$

missä t on tarkasteltavan levyn paksuus ja G on tarkasteltavan levyn liukumoduuli. (Leskelä 2005, kaavat 3.2, 3.3, 3.4 ja 3.5)

Potentiaalienergian minimi saavutetaan, kun tämä derivoidaan muuttujien u_x , u_y ja γ suhteen ja yhtälöiden suuruudet määritetään nolllaksi. Tällöin muuttujien arvot saadaan kaavoilla 70, 71 ja 72. (Leskelä 2005, kaavat 3.7, 3.8 ja 3.9)

$$\frac{\partial U}{\partial u_x} = \frac{Ku_x}{y_{max}^2} \sum_{i=1}^n y_i^2 - 2F = 0 \rightarrow u_x = \frac{y_{max}^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \frac{2F}{K} \quad (70)$$

$$\frac{\partial U}{\partial u_y} = \frac{Ku_y}{x_{max}^2} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{2H}{B} F = 0 \rightarrow u_y = \frac{x_{max}^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \frac{2HF}{BK} \quad (71)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \gamma} = tBHG\gamma - HF = 0 \rightarrow \gamma = \frac{F}{tBG} \quad (72)$$

Liittimissä vaikuttava leikkausvoiman maksimiarvo saavutetaan, kun liittimen ja levyn painopisteen välinen etäisyys on mahdollisimman suuri. Tällöin tarkasteltava liitin sijaitsee levyn nurkassa. Leikkausvoiman suuruus voidaan määrittää kaavalla 73. Kun kaavaan sijoitetaan potentiaalienergian minimistä saadut muuttujien u_x ja u_y arvot, voidaan yhtälö yksinkertaistaa määrittämällä kiinnitystapakerroin α .

$$F_{max} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = K\sqrt{u_x^2 + u_y^2} = \alpha HF, \quad (73)$$

missä

F_{max}	on liittimessä vaikuttavan leikkausvoiman maksimiarvo
F_x	on liittimessä vaikuttavan leikkausvoiman x-komponentti
F_y	on liittimessä vaikuttavan leikkausvoiman y-komponentti
α	on kiinnitystapakerroin. (Leskelä 2005, kaava 3.10)

Kiinnitystapakerroin α määritetään kaavalla 74. (Leskelä 2005, kaava 3.12)

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{x_{max}}{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right)^2 + \left(\frac{y_{max}}{\sum_{i=1}^n y_i^2}\right)^2} \quad (74)$$

Suunnittelutyön nopeuttamiseksi tyypillisille kiinnitystavoille on taulukoitu kiinnitystapakerroimet liitteessä 8.

Kiinnitysrungon yläreunan lopullinen siirtymä u määritetään kaavalla 75. Kun kaavaan sijoitetaan potentiaalienergian minimistä saadut muuttujien u_x , u_y ja γ arvot, voidaan yhtälö yksinkertaistaa määrittämällä kiinnitystapakerroin β .

$$u = 2u_x + \frac{2H}{B}u_y + H\gamma = \left(\frac{\beta H^2}{K} + \frac{H}{t_{BG}}\right)F, \quad (75)$$

missä β on kiinnitystapakerroin. (Leskelä 2005, kaava 3.11) Kiinnitystapakerroin määritetään kaavalla 76. (Leskelä 2005, kaava 3.13)

$$\beta = \frac{1}{(\sum_{i=1}^n x_i^2)} + \frac{1}{(\sum_{i=1}^n y_i^2)} \quad (76)$$

Kun levyt kiinnitetään kohtisuoraan kuormitukseen nähden, määritetään levyjäykistystason liittimissä vaikuttava maksimivoima kaavalla 77. (Leskelä 2005, kaava 3.30)

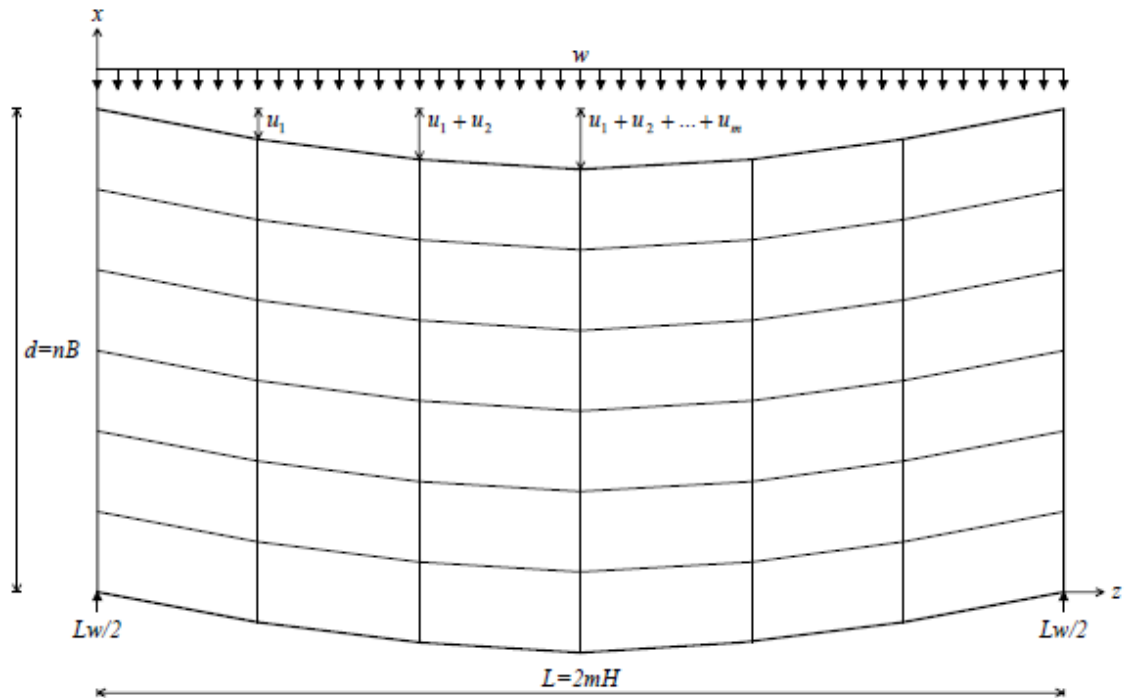
$$F_{max} = \frac{\alpha H L w}{2n} \quad (77)$$

Kun levyt kiinnitetään kuormituksen suuntaisesti, määritetään voima kaavalla 78. (Leskelä 2005, kaava 3.31)

$$F_{max} = \frac{\alpha B L w}{2n} \quad (78)$$

Liittimet ja näiden jakovälit tulee suunnitella siten, että yksittäisen liittimen kestävyys on suurempi tai yhtä suuri kuin kaavojen 77 ja 78 voimasuureet. (Leskelä 2005, kaavat 4.1a ja 4.1b)

Leikkausvoima aiheuttaa levyille muodonmuutoksen, jotka aiheuttavat levyjäykistystason siirtymän kuvan 39 mukaan. (Leskelä 2005)



Kuva 39. Leikkausvoimista aiheutuva levykentän siirtymä (Leskelä 2005, kuva 3.13)

Tason siirtymän suuruutta määritettäessä käytetään kuormittavana voimana keskimääräistä leikkausvoimaa $V_{mean} = Lw/4$. Keskimääräinen leikkausvoima jakautuu yksittäisille levyille tason leveyssuunnassa. Yksittäisen levyn siirtymän aiheuttava kuorma määritetään kaavalla 79. (Leskelä 2005, kaava 3.32)

$$\frac{F}{n} = \frac{V_{mean}}{n} = \frac{Lw}{4n} \quad (79)$$

Leikkausvoimasta aiheutuvalle kokonaissiirtymälle levykentän keskellä on johdettu kaavat, jotka huomioivat levyjen kiinnityssuunnan kuormituksen suuntaan nähden. Kun levyt kiinnitetään kohtisuoraan kuormituksen suuntaan nähden, määritetään siirtymä u kaavalla 80. (Leskelä 2005, kaava 3.33)

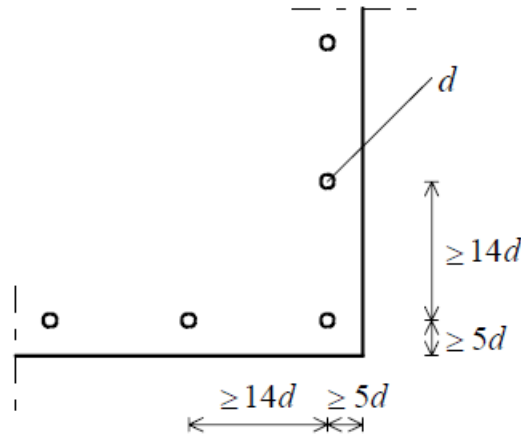
$$u = \left(\beta \frac{H^2}{K} + \frac{H}{tBG} \right) \frac{mLw}{4n} \quad (80)$$

Kun levyt kiinnitetään kuormituksen suuntaisesti, määritetään siirtymä u kaavalla 81. (Leskelä 2005, kaava 3.34)

$$u = \left(\beta \frac{B^2}{K} + \frac{B}{tBG} \right) \frac{mLw}{4n} \quad (81)$$

Leskelä on määrittänyt siirtymälle raja-arvon. Siirtymän suuruuden täytyy olla pienempi tai yhtä suuri kuin $h/300$, kun h on seinäjäykistyskorkeus tason jännevälin puolella välissä (tarkastelupisteen korkeus). (Leskelä 2005, kaavat 4.2a ja 4.2b)

Suunnitteluohjeen kiinnitystapakertoimet mahdollistavat kiinnitysliittimien mielivaltaisen sijoittamisen. Tästä huolimatta levyjen kiinnityksessä tulee huomioida riittävät reunaetäisyydet, sekä liittimien väliset minimietäisyydet. Minimietäisyydet on esitetty kuvassa 40, missä d on liittimen halkaisija.



Kuva 40. Liittimien vähimmäisetäisyydet (Leskelä 2005, kuva 4.17)

Reuna- ja vähimmäisetäisyyksillä varmistetaan levyn reunojen kestävyys kuormituksessa.

3.2 Vertailu olemassa oleviin suunnitteluohjeisiin

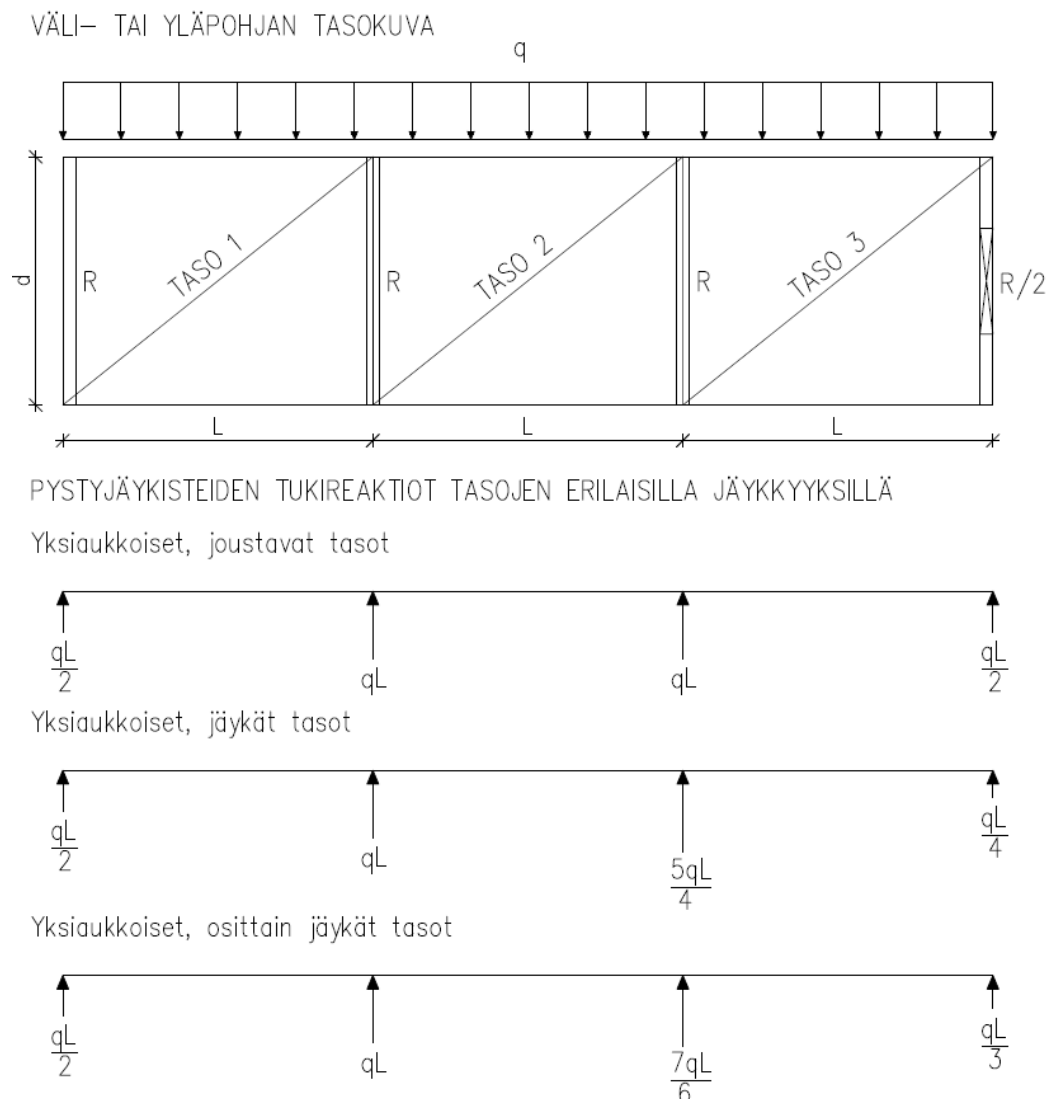
Leskelän suunnitteluohje sisältää huomattavasti enemmän teorian tietoa ja suunnitteluyhtälöitä kuin Suomessa nykyisin käytössä olevat eurokoodi EN 1995-1-1 ja RIL 205-1-2017. Teoriaosuus on silti puutteellinen tason rakennemallimäärittämis- ja yksityiskohtien osalta verrattuna Yhdysvaltojen ja Kanadan lähteisiin. Liitteeseen 10 on koottu käsiteltävien suunnitteluohjeiden mitoitusyhtälöt taulukkomuodossa.

Eurokoodi ja RIL 205-1-2017 eivät anna jäykistysrakenteiden kuormitusperusteita, vaan nämä täytyy määrittää standardien ja suunnitteluohjeiden asianomaisista osista. Leskelän, Ruotsin, Yhdysvaltojen ja Kanadan ohjeissa kuormitusperusteet on huomioitu. Leskelä on esittänyt jäykistysrakenteita kuormittavat voimat tarkasti kuvilla 27 ja 28, mutta oletuksena näissä on levyjäykistystason yksiaukkoisuus ja koko rakennuksen pohjapinta-alan kattavuus. Ruotsin, Yhdysvaltojen ja Kanadan ohjeista poiketen Leskelä sivuuttaa levyjäykistysrakenteiden monimuotoisuuden ja aukotukset toteamalla, että näissä tapauksissa taso voidaan jakaa pienempiin suorakaiteen muotoisiin ja aukottomiin osiin, jotka on kiinnitetty toisiinsa. Rakenteiden toteutusta ja liitoksia ei kuitenkaan esitetä. Tästä syystä esimerkiksi jäykistävien väliseiniä vaikuttavien levyjäykistystason toimintaan ei huomioida.

Eurokoodin ja RIL 205-1-2017:n tapaan Leskelä jättää levyjäykistystason rakennemallimäärittämis- ja käsittelykseen, joka on huomioitu Ruotsissa, Yhdysvalloissa ja Kanadassa.

Puurunkoiset jäykistystasot todetaan myös näissä lähteissä yleensä joustaviksi, mutta jäykällä pintarakennekerroksilla ja lyhyillä jänneväleillä joustavuus ei ole yksiselitteistä. Rakennemallioletuksella on suora vaikutus pystyjäykisteiden kuormituksiin. Joustava taso jakaa kuormitukset pystyjäykisteille näiden vaikutusalojen mukaan, kun jäykän tason tapauksessa kuormitukset jaetaan pystyjäykisteiden jäykkyyksien suhteessa. Leskelän suunnitteluohjeessa taso idealisoidaan joustavaksi, eikä muita rakennemallivaihtoehtoja tai näiden vaikutuksia käsitellä. Tämä saattaa johtaa jäykempien tasorakenteiden tapauksessa epävarmalla puolella oleviin pystyjäykisteiden suunnitteluratkaisuihin.

Pystyjäykisteiden tukireaktioiden vaihtelua on havainnollistettu kuvalla 41, jossa päädyssä olevan pystyjäykisteen jäykkyys on muita jäykisteitä pienempi ($R/2$). Konkreettinen esimerkki tällaisesta rakenteesta on päätyseinä, jossa on suuria aukkoja.



Kuva 41. Pystyjäykisteiden tukireaktioiden vaihtelu tason erilaisilla jäykkyysoletuksilla

Kuvassa 41 q on rakennuksen vaakasuuntaisen tasainen kuorman suuruus, d on tason leveys, L on tason jänneväli ja R on pystyjäykisteen jäykkyyden suuruus. Huomataan,

että jäykällä ja osittain jäykällä tasolla tason 3 vasemman puoleisen pystyjäykisteen kuormitus on suurempi kuin yleisesti käytetyllä joustavalla taso-oletuksella. Voimasuureiden määrittämisessä on oletettu, että osittain jäykän tason toimintamalli on joustavan ja jäykän tason välimuoto, eikä kuormien vääntövaikutuksia ole huomioitu.

Leskelän jäykistystason suunnittelussa hyödynnetään tason analogiaa korkeaan I-palkkiin, joka on myös muissa lähteissä käytetty toimintaoletus. Palkin oletetaan tukeutuvan nivelellisesti jäykistäviin päätyseiniin, kuten muissakin lähteissä. Jäykistystason rakenneosat ja näiden toimintaperusteet ovat kaikissa lähteissä samat; levytyksellä otetaan vastaan tason leikkausrasitus ja reunapalkeilla taivutusrasitus.

Tason rakenneosien suunnitteluperusteissa ja -yhtälöissä on eroavaisuuksia lähteiden välillä. Tasossa vaikuttava leikkausvoima ja taivutusmomentti määritetään kaikissa lähteissä tasaisesti kuormitetun yksiaukkoisen palkin statiikasta. Leskelä on esittänyt yleiset kaavat 54 ja 56, joilla voimasuureet voidaan määrittää tason eri tarkastelupisteissä. Tason reunapalkit mitoitetaan kaikissa lähteissä samoin perustein; taivutusmomentista aiheutuvalla normaalivoimalla. Leskelä on määrittänyt reunapalkeissa vaikuttavalle normaali-voimalle kaavan 58, jonka sisältö on sama kaikissa lähteissä. Leskelä käyttää reunapalkkina puurakenteisten jäykistysseinien yläjuoksua, mikä todetaan yleiseksi rakenneratkaisuksi myös muissa lähteissä. Muita reunapalkkirakenteita ei esitetä. Yhdysvaltojen ohjeissa on käsitelty myös muita rakennevaihtoehtoja, kuten seinien aukkopalkkeja, sekä muurattujen ja betonisten seinärakenteiden raudoitusteräksiä. Yleensä reunapalkkina, eli puurakenteisen seinän yläjuoksuna, käytetään rakennesahatavaraa, jonka yleisimmät pituudet Suomessa ovat välillä 2,7...6,0 m 300 mm:n jaolla. (Puuinfo 2018) Tällöin laajoihin rakennuksiin on välttämätöntä suunnitella reunapalkkien jatkoksia. Leskelä, eurokoodi, RIL 205-1-2017 ja Ruotsin ohjeet eivät ota jatkoksiin tai näiden toteuttamiseen kantaa. Yhdysvaltojen ja Kanadan ohjeissa jatkoksille esitetään suunnitteluperusteet ja esimerkkirakenteet.

Kaikissa lähteissä oletetaan leikkausvoiman olevan tarkastelupisteen poikkileikkauksessa vakio tason leveyssuunnassa. Leikkausvoima otetaan vastaan tason levytyksellä, mutta suunnitteluyhtälöissä on huomattavia eroja lähteiden välillä. Eurokoodi ja Ruotsin suunnitteluohjeet määrittävät tason leikkauskestävyyden yksittäisen liittimen leikkauskestävyyden mukaan kaavoilla 6 ja 33. Levyjen kiinnitystapa on näissä tapauksissa suljettu, eli kiinnitysliittimet sijaitsevat levyn kaikilla reunoilla. Eurokoodi mahdollistaa liitinjaon suurentamisen levyjen epäjatkuvilla reunoilla tason kestävyttä pienentämättä, mikäli levyt limitetään kuvan 1 mukaan. RIL 205-1-2017 määrittää tason leikkauskestävyyden kaavalla 9. Ohje huomioi levyjen erilaiset kiinnitystavat kiinnitystapakertoimilla γ ja β , mutta näiden käyttömahdollisuudet rajoittuvat kahdeksaan taulukoituun kiinnitystapaan (liite 1). Lisäksi RIL 205-1-2017 antaa ehdon 10, jonka mukaan suoritetaan levyn leikkaus- ja lommahdustarkastelu. Yhdysvalloissa ja Kanadassa käytetään taulukoituja leikkauskestävyyden arvoja tyyppirakenteille, jotka huomioivat liittimien ja levyjen materi-

aaliominaisuudet ja dimensiot tietyillä kiinnitystavoilla. Suunnittelijan vastuulle jää taulukoiden oikea tulkinta ja soveltaminen erityistapauksissa. Yhdysvaltojen ohjeista poiketen Kanadan ohjeessa on määritetty kaavat 40 ja 43, joilla taulukkojen kestävyysarvot on määritetty. Taulukkoarvoja on näin ollen mahdollista muokata tietyissä tapauksissa. Lisäksi Kanadan ohjeessa suoritetaan levyjen lommahdustarkastelu kaavalla 43.

Leskelän ohjeessa tason leikkauskestävyydelle on määritetty yhtälöt 77 ja 78, jotka huomioivat levyjen kiinnityssuunnan ja kiinnitystavan. Kiinnitystapa huomioidaan RIL 205-1-2017 tapaan kiinnitystapakertoimilla α ja β , mutta Leskelä on johtanut näille lineaarisen kimmoteorian mukaiset yhtälöt 74 ja 76, joilla on mahdollista määrittää kerroin mielivaltaiselle kiinnitystavalle. Kertoimella α määritetään tason leikkauskestävyys ja kertoimella β tason taipuma. Leskelän ja RIL 205-1-2017:n kiinnitystapakertoimia on vertailtu liitteessä 9. Vertailun perusteella on johdettu muunnoskaavat (82 ja 83), jotka mahdollistavat Leskelän kiinnitystapakertoimien käytön RIL 205-1-2017 suunnitteluohjeessa.

$$\gamma_i = \frac{\alpha b_i H}{s_i} \quad (82)$$

$$\beta_i = \frac{\beta b_i^3}{s_i} \quad (83)$$

Huomioitavaa on, että eurokoodin ohjeistuksesta poiketen Leskelä ei ota kantaa levyjen limityksen vaikutuksesta tason leikkauskestävyyteen. Lisäksi Leskelä ei ota huomioon levyjen leikkautumista tai lommahtamista, mikä tarkastetaan RIL 205-1-2017:ssä ehdolla 10.

Jäykistystason taipuman määrittämisessä on huomattavia eroja lähteiden välillä. Eurokoodissa ja Ruotsin ohjeissa ei huomioida tason taipumaa mitenkään. RIL 205-1-2017, Yhdysvaltojen, Kanadan ja Leskelän ohjeet määrittävät tason taipuman, mutta mitoitusyhtälöt eroavat toisistaan. RIL 205-1-2017 huomioi leikkausvoimasta ja taivutusmomentista aiheutuvan taipuman kaavalla 29. Leikkausvoimasta aiheutuva taipuma on riippuvainen levytyksestä, taivutusmomentista aiheutuva taipuma puolestaan reunapalkkien lujuuksista ja dimensioista. Taipuman maksimiarvo määritetään rakennustyyppikohtaisesti. Rakennuksien vaakasiirtymän yleiseksi raja-arvoksi annetaan $h/300$, missä h on tarkastelupisteen korkeus. Kerrostaloissa raja-arvoksi annetaan $h/500$ ylimmän kerroksen lattiatason korkeudella. Ohjeen mukaan hallirakennuksissa vaakasiirtymästä ei yleensä ole haittaa, jolloin tämän suuruutta ei tarvitse tarkistaa.

Yhdysvaltojen ohjeessa huomioidaan taivutusmomentista, leikkausvoimasta, levyjen kiinnitysliittimien liukumasta ja reunapalkkien liitoksien liukumista aiheutuvat tason osataipumat. Yhtälöt on määritetty erikseen naula/ruuvikiinnityksille ja hakaskiinnityksille kaavoina 36 ja 37. Taipuman suuruuksista määritetään jäykistystason rakennemalli, mutta raja-arvoja taipuman maksimiarvolle ei anneta. Kanadassa käytettävä taipuman yhtälö

sisältää samoja muuttujia kuin Yhdysvalloissa käytössä olevat yhtälöt. Verrattaessa näitä keskenään huomataan, että Kanadan ohjeessa tason taipumaa arvioidaan kiinnitysluokasta riippumatta yhtälöllä, joka on Yhdysvalloissa käytössä vain hakaskiinnityksissä (kaavat 48 ja 37). Yhdysvaltojen yhtälöiden tapaan Kanadassa ei määritetä raja-arvoa taipuman maksimiarvolle. Leskelän suunnitteluohjeessa tason taipuma määritetään leikkauskuormituksella. Yhtälöt huomioivat levyjen lukumäärän, kiinnityssuunnan ja kiinnitystavan. Ohjeessa ei huomioida taivutusmomentista aiheutuvaa taipumaa, mikä on selkeä eroavaisuus muihin lähteisiin. Leskelän yhtälöissä reunapalkkirakenteilla ei tällöin ole vaikutusta taipuman suuruuteen. Leskelä antaa tason taipumalle saman raja-arvon kuin RIL 205-1-2017 (*h/300*), mutta ei ota tässä kantaa rakennustyyppiin.

Jäykistystason liitoksien ja yksityiskohtien suunnitteluperusteet ja esimerkkirakenteet esitetään vaihtelevasti eri lähteissä. Ruotsin ohjeissa ei oteta kantaa liitoksiin. Eurokoodi ja RIL 205-1-2017 huomioivat ainoastaan levyjen epäjatkuvan reunan kiinnityksen eurokoodin mukaisessa yksinkertaistetussa analyysissä (kuva 2). Yhdysvaltojen ohjeissa määritetään liitosten suunnitteluperusteet ja annetaan näihin rakenne-esimerkit sekä puurakenteisten seinien, että kivirakenteisten seinien tapauksissa. Lisäksi huomioidaan eri suuristen aukotusten vaikutukset tason toimintaan, ja annetaan näiden vahvistamiseksi suunnitteluperusteet. Kanadan ohjeessa annetaan liitosten suunnitteluperusteet ja rakenne-esimerkit. Aukotusten vaikutusta sivutaan sanallisesti, konkreettisia suunnitteluperusteita antamatta. Leskelä antaa kattavat liitosesimerkit tason liitoksista puurunkoisiin seiniin sekä ylä- että välipohjan tapauksissa. Muihin kuin puurakenteisiin seinäratkaisuihin ei oteta kantaa, kuten ei myöskään tason aukotuksiin.

Teoreettisen vertailun lisäksi suunnitteluohjeita vertailtiin laskennallisesti kahden taso-esimerkin avulla. Tarkastellut tasotapaukset ja laskentaraaportti on esitetty liitteessä 12. Vertailun tasovalinnat tehtiin suunnitteluohjeiden sisällön perusteella. Tavoitteena oli, että suunnittelu olisi mahdollista toteuttaa kaikilla menetelmillä tarkasti vertailun mahdollistamiseksi. Tästä syystä levyjen kiinnitystavat tuli valita RIL 205-1-2017 mukaan, sillä ohjeen suunnittelumenetelmä vaatii kiinnitystapakertoimien käyttöä, joiden määrä todettiin rajoitetuksi. Kiinnitystavoiksi valittiin 2 ja 7 (liite 1), joista kiinnitystapa 2 on suljettu ja kiinnitystapa 7 avoin. Rajoitettujen kiinnitystapojen vuoksi toiseen tasotapaukseen levyjen kiinnitysrungon suuntaa jouduttiin muuttamaan 90 astetta. Vertailu toteutettiin analysoimalla tason leikkauskestävyyden käyttöasteita, sekä siirtymien suuruuksia.

Laskennan tuloksista huomattiin, että suljetulla kiinnitystavalla suunnittelumenetelmät päätyivät saman suuruusluokan leikkauskestävyyksien käyttöasteisiin, pois lukien USA:n suunnittelumenetelmä, jonka tulos ei ole suunnitteluperuste-eroavaisuuksien vuoksi suoraan vertailukelpoinen. Leskelän suunnitteluohje ja RIL 205-1-2017 päätyvät lähes identtisiin käyttöasteisiin (73,6% ja 73,4%). Siirtymän osalta erot ohjeiden välillä ovat suurempia. Leskelän menetelmällä päädytään pienimpään siirtymän arvoon (6,992 mm), kun

RIL 205-1-2017 päättyy arvoon 11,718 mm. USA:n ja Kanadan ohjeet huomioivat siirtymässä enemmän osatekijöitä ja päätyvätkin suurempiin siirtymäarvoihin (17,805 mm ja 17,713 mm). Ero näiden ja Leskelän siirtymäarvon välillä on merkittävä (255%).

Avoimella kiinnitystavalla tuloksissa on merkittäviä eroja suunnitteluohjeiden välillä. Eurokoodi ja Ruotsin suunnitteluohje eivät mahdollista tason suunnittelua. Muilla ohjeilla leikkauskestävyyksien käyttöasteissa on suuria eroja. Huomataan, että kiinnitysrungon suunnan muuttamisella ja kiinnitystavan vaihtamisella suljetusta avoimeksi päädytään heikompaan kestävyysasteeseen. Leskelän menetelmällä päädytään käyttöasteeseen 167,6% ja RIL 205-1-2017:lla käyttöasteeseen 208,8%. USA:n ohje on jälleen vertailun ulkopuolella, Kanadan ohjeella päädytään pienimpään käyttöasteeseen 130,5%. Tason siirtymän suuruudet kasvoivat verrattuna edelliseen tasotapaukseen. Leskelän menetelmällä päädyttiin jälleen pienimpään siirtymän arvoon (15,61 mm), kun RIL 205-1-2017 päättyy arvoon 27,042 mm. Ero näiden välillä on merkittävä (173%). USA:n ja Kanadan ohjeet päätyvät tuloksiin 24,263 mm ja 17,713 mm. Ero näiden välillä johtuu Kanadan ohjeessa olevasta puutteesta avoimen kiinnitystavan huomioimisessa. Laskennallisen vertailun tarkempi analysointi on esitetty liitteen 12 laskentaratkaisussa. Taulukkoon 3 on koottu laskennallisen vertailun tulokset.

Taulukko 3: Laskennallisen vertailun tulokset

Tasotapaus 1, suljettu kiinnitystapa nro 2		
Suunnitteluohje	Leikkauskestävyyden käyttöaste	Kokonaissiirtymä
EN 1995-1-1	74,2 %	-
RIL 205-1-2017	73,4 %	11,718mm
Ruotsi	74,2 %	-
USA	37,0 %	17,805mm
Kanada	87,4 %	17,713mm
Leskelä 2005	73,6 %	6,992mm

Tasotapaus 2, avoin kiinnitystapa nro 7		
Suunnitteluohje	Leikkauskestävyyden käyttöaste	Kokonaissiirtymä
EN 1995-1-1	-	-
RIL 205-1-2017	208,8 %	27,042mm
Ruotsi	-	-
USA	73,4 %	24,263mm
Kanada	130,5 %	17,713mm
Leskelä 2005	167,6 %	15,610mm

Leskelän suunnitteluohje on sellaisenaan kattava yksinkertaisten puurunkoisten rakennusten levyjäykistystasojen suunnitteluun. Oletukset tason yksiaukkoisuudesta ja joustavasta toiminnasta saattavat jäykkien tai todellisuudessa jatkuvien tasojen tapauksissa johtaa pystyjäykisteiden epävarmalla puolella oleviin suunnitteluratkaisuihin. Tämän vuoksi tason jäykkyydelle tulisi asettaa raja-arvo, jolla suunnittelussa käytettävä rakennemalli

määritetään. Lisäksi tason jatkuvuutta jäykistävien väliseinien kohdalla tulisi tutkia tarkemmin ja vaikutukset huomioida rakenneosien suunnittelussa. Leskelän johtamat kiinnitystapakertoimet tekevät ohjeen laskentamenetelmästä yksityiskohtaisemman kuin nykyisissä suunnitteluohjeissa olevat menetelmät. Puutteena tason kestävyysmäärityksessä on levyjen leikkausjännitys- ja lommahdustarkastelun sivuutus, sekä levyjen limityksen huomioiminen, joihin Leskelän mitoitusyhtälöt eivät ota kantaa. Lisäksi tason taipuman määrittäminen on taivutusmomentin osalta puutteellinen, sillä muissa lähteissä huomioitujen reunapalkit ja näiden jatkokset jäävät huomiotta. Liitosten toteutus puurunkoisissa rakennuksissa esitetään riittävällä laajuudella, mutta muiden seinärakenteiden osalta liitosten toteutus tulisi lisätä, kuten myös aukotusten vahvistusperiaatteet.

4. SUUNNITTELUOHJEEN KEHITYS

4.1 Lähtökohdat

Kirjallisuuskatsauksessa sekä Suomen olemassa olevat että Leskelän kimmoteoriaan perustuva suunnittelumenetelmä todettiin tason rakennemallimäärittäytksen ja yksityiskohtien osalta puutteelliseksi. Luvussa 3.2 on esitetty erot Leskelän ja luvussa 2 avattujen suunnitteluohjeiden välillä. Leskelän laskentamenetelmä todettiin yksityiskohtaisimmaksi yksinkertaisissa tasorakenteissa, mutta oletukset ja yksinkertaistukset jäykistystason toiminnasta rajoittavat tämän käyttöä haastavissa tapauksissa. Leskelän laskentamenetelmä on yksityiskohtaisuutensa vuoksi järkevin lähtökohta lopullisen suunnitteluohjeen kehitykseen. Levyjäykistystason toimintaa tulee tutkia ja analysoida ongelmakohtissa, jonka jälkeen Leskelän suunnittelumenetelmä voidaan kehittää kattavampaan muotoon.

Luvussa 4.2 avataan tässä diplomityössä havaitut levyjäykistystasojen ongelmakohdat, joiden tutkiminen ja analysointi on oleellista lopullisen suunnitteluohjeen kehityksessä. Näiden selventyminen ja toimintaohjeiden laatu määrittää suunnitteluohjeen lopullisen toimivuuden. Kehitysprosessin tavoitteeksi tulee asettaa ongelmakohtien ratkeaminen ja riittävän tutkimusdatan saavuttaminen.

4.2 Kehitystarpeet ja tutkimusmenetelmät

Levyjäykistystasojen suunnitteluohjeiden kehitystarpeet liittyvät tason rakennemalliin, jatkuvuuteen ja yksityiskohtien suunnitteluun. Tason toimintaa kuvaavan rakennemallin määrittämisessä on merkittäviä puutteita sekä Suomessa nykyisin käytössä olevassa ohjeistuksessa että Leskelän ohjeessa. Ohjeet olettavat tason toimivan joustavana palkkina, eikä todelliseen jäykkyyteen ja toimintaan oteta kantaa. Rakennemallivalinta vaikuttaa oleellisesti jäykistysrakennekokonaisuuden voimasuureisiin, kuten luvussa 3.2 on todettu, minkä vuoksi oletus tason joustavuudesta voi johtaa tietyissä tapauksissa epävarmalla puolella oleviin suunnitteluratkaisuihin.

Tason jäykkyyteen vaikuttavat sekä tason rakenneosat että tämän mittasuhteet. Tiheillä liitinjaoilla kiinnitetyt levyt ja lyhyt tason jänneväli (pituus-levyysuhde) ovat lähtökohtia jäykälle tasolle, kun taas harva liitinjako ja pitkä jänneväli ovat ominaisia joustavalle tasolle. Tason toimintaan vaikuttaa sekä tämän jäykkyys että tätä tukevien pystyjäykisteiden jäykkyys. Tason todellinen toimintamalli riippuu pystyjäykisteiden ja tason suhteellisesta jäykkyydestä. Käytännössä joustava taso voi toimia jäykkänä tasona voimasuureiden siirrossa, mikäli tätä tukevien pystyjäykisteiden joustavuus on suuri. Toisaalta edellistä huomattavasti jäykempi taso voi toimia joustavana, mikäli pystyjäykisteiden jäykkyys on suuri. Raja-arvoja suhteellisille jäykkyyksille ei nykyisistä suomalaisista suunnitteluohjeista löydy.

Tasolle tulee määrittää reunaehdot, joiden mukaan rakennemalli määritetään. Reuna-ehdojen tulee sisältää jäykistysrakenteiden suhteellisten jäykkyyksien raja-arvot, sekä mahdollisesti tason mittasuhteiden perusteella määritettävän tason rakennemallin yksinkertaistuksen. Esimerkiksi lyhyillä jänneväleillä oletusta tason jäykästä rakennemallista tulisi tutkia, sillä tämä yksinkertaistaisi pienten rakennusten suunnitteluprosessia. Reuna-ehdojen määrittäminen koejärjestelyin on työlästä, sillä tasorakenteita tulee tutkia useilla erilaisilla mittasuhteilla ja sekä vaakasuuntaisten tasorakenteiden että pystyjäykisteiden jäykkyyksillä. Tämän vuoksi soveltuvin tutkimusmenetelmä tason rakennemallimäärittäykseen voisi olla FEM-mallintaminen, joka mahdollistaisi erilaisten rakenteiden toiminnan analysoinnin taloudellisesti. Erilaisten rakennevaihtoehtojen tutkimisella saataisiin selville reuna-ehdojen teoreettiset arvot, jonka jälkeen näiden toiminta tulee varmentaa todellisten tasorakenteiden koekuormituksilla. Koejärjestelyt tulee suunnitella siten, että näiden tuloksena saadaan mittausdataa tason kriittisistä tarkastelupisteistä, jotka on ennalta määritetty FEM-laskelmin. Tällöin koejärjestelyiden suoritus on tehokkainta ja taloudellisinta.

Rakennemallivalinnan lisäksi suunnitteluohjeissa käytetään oletusta jäykistystason yksiaukkoisuudesta, joka ei kaikissa tapauksissa ole pätevä. Oletus on yleisesti käytössä sekä Suomen nykyisissä että Leskelän suunnitteluohjeessa. Mikäli tason päätyjen välillä on tätä tukevia pystyjäykisteitä, kuten jäykistäviä väliseiniä, jakaantuu taso ohjeiden mukaan näiden kohdalta yksiaukkoisiin tasolohkoihin. Oletus on perusteltu, mikäli tasorakenne on todellisuudessakin epäjatkuva, eli rakenne katkeaa välijäykisteen kohdalla. Oletus yksiaukkoisuudesta ei ole perusteltu, mikäli taso todellisuudessa jatkuu tukirakenteen yli jatkuvana rakenteena. Huomioitavaa on, että jäykistävien väliseinien jäykkyydet vaikuttavat tason rakennemalliin. Esimerkiksi tietyissä tapauksissa jäykistävä väliseinä voi olla huomattavasti jäykempi kuin runsaasti aukotettu päätyseinä. Mikäli päätyseinä on riittävän joustava, taso toimii ulokepalkkina. Tämänkaltaisia tasorakenteita nykyiset suunnitteluohjeet eivät huomioi mitenkään. Tästä syystä tason päätyjen välillä olevien pystyjäykisteiden vaikutukset tulee huomioida kohdekohtaisesti, rakenteiden todelliset ominaisuudet huomioiden.

Levyjäykistystason oletetaan tukeutuvan nivelellisesti pystyjäykisteisiin, kuten jäykistäviin päätyseiniin. Oletus on päätyseinien osalta perusteltu, sillä seinän jäykkyys tasonsa kohtisuorassa suunnassa on pieni, mikä mahdollistaa jäykistystason päiden kiertymän. Oletus nivelellisestä tukeutumisesta on ohjeiden mukaan käytössä myös jäykistävän väliseinän tapauksessa, jossa seinän molemmilla puolilla on levyjäykistystaso. Tässä tapauksessa seinän eri puolilla olevat tasojen päädyt pyrkivät kiertymään vastakkaisiin suuntiin, jonka vuoksi liitoksen todellinen toiminta poikkeaa päätyseinäliitoksesta. Mikäli liitos ei toimi nivelenä, vaan esimerkiksi osittain jäykkänä, aiheutuu tästä jäykistystasolle ja seinärakenteelle kuormituksia, joita ei nykyisissä ohjeissa huomioida mitenkään.

Levyjäykistystason jakaantuminen yksiaukkoisiin nivelellisesti tuettuihin lohkoihin ei ole yksiselitteistä, sillä tason toimintaan vaikuttavat tason todellinen jatkuvuus, rakenteiden jäykkyudet ja tasolohkojen liitokset pystyjäykisteisiin. Suunnitteluohjeeseen tulee määrittää reunaehdot, joiden mukaan tasojen suunnittelu toteutetaan rakennuksissa, joissa on pystyjäykisteitä tason päätyjen välillä. Ehtojen tulee huomioida tason todellinen jatkuvuus ja liitoksien toiminta. Näiden ongelmakohtien tutkiminen koejärjestelyin vaatisi huomattavan määrän erilaisia rakenne- ja liitoskoonpanoja, minkä vuoksi tässäkin tapauksessa järkevintä olisi analysoida rakenteiden toimintaa FEM-mallinnuksella. Mallintamisen perusteella voidaan määrittää alustavat mitoitusasteot ja reunaehdot, jotka tulee todentaa koekuormituksilla.

Levyjäykistystasot sisältävät aukkoja, kuten porrashuoneita ja erilaisia läpivientejä. Näiden vaikutukset huomioidaan puutteellisesti Suomen nykyisissä suunnitteluohjeissa. Leskelä sivuuttaa aukotukset tason lohkotuksella pienempiin osiin, mutta näiden todellinen toiminta tulee selvittää ja avata tulevaan suunnitteluohjeeseen. Aukotuksia on tutkittu koekuormituksin Yhdysvalloissa (Research Report 138 – Plywood Diaphragms 2000), ja tämän mukaiset reunojen vahvistustarpeet on avattu luvussa 2.4. Aukkojen koko vaikuttaa reunojen vahvistustarpeisiin, mutta konkreettisia raja-arvoja tai suunnitteluohjeita vahvistuksille ei ole. Suunnitteluohjeeseen tulee sisällyttää ohjeistus aukkojen reunavahvistuksien määrittämisestä. Aukkojen vaikutusta tason voimasuureisiin on jälleen järkevintä analysoida FEM-mallinnuksella, jolla voidaan tutkia tehokkaasti eri kokoisten aukkojen toimintaa erilaisissa tasorakenteissa. Mallinnuksen perusteella kehitettävä mitoitusasteoria tulee todentaa koekuormituksilla.

Ongelmakohtien tutkimisen lisäksi on tarpeellista verrata Leskelän laskentamenetelmän ja nykyisten Suomessa käytössä olevien suunnitteluohjeiden (SFS-EN 1995-1-1 ja RIL 205-1-2017) eroja yksinkertaisessa tasotapauksessa. Vertailu tulee toteuttaa tietyille tasorakennetekonaisuudelle laskennallisesti, jonka jälkeen koekuormituksilla todennetaan suunnittelumenetelmien tarkkuus. Tavoitteena on todentaa Leskelän suunnitteluohjeen mukaisen tason kuormituskestävyyden tarkkuus verrattuna muiden ohjeiden mukaisiin kestävyysarvoihin. Tarpeellista olisi myös todentaa Leskelän kiinnitystapakertoimien toimivuus koekuormittamalla erilaisilla kiinnitystavoilla toteutettuja tasorakenteita.

Suunnitteluohjeen kehityksessä tarvittavien FEM-analyysien määrää ja sisältöä on arvioitu liitteessä 11. Liitteen taulukoihin on sisällytetty tutkittavien levyjäykistystasojen lähtötiedot ja analysoitavat tulokset, joiden mukaan lisätutkimukset on mahdollista aloittaa. Taulukoihin valitut muuttujat perustellaan näiden yhteydessä. Oleellista on, että jäykistystaso mallinnetaan FEM-ohjelmaan todenmukaisesti, levyjen ja kiinnitysliittimien sijainnit ja ominaisuudet huomioiden. Kiinnitysliittimet tulee mallintaa jousina, joiden jäykkyyksiksi tulee asettaa koekuormituksista todennetut levy-liitinkohtaiset arvot. Tutkittavien tasojen kuormituksen ja levyjen kiinnitystapojen tulee olla samat tuloksien vertailun mahdollistamiseksi. Tasojen muotosuhteet, pystyjäykisteiden jäykkyudet ja aukkojen ominaisuudet ovat muuttujia, joiden mukaan analysoitavat tulokset määrittyvät.

Koekuormitusjärjestelyiden suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota niin tutkimusdatan kuin työturvallisuudenkin kannalta. Jäykistystasot ovat kokoluokaltaan suuria, jonka vuoksi tutkimustilojen tulee olla tilavat. Mittauslaitteiston tulee olla testausstandardien mukaisia, millä varmistetaan tulosten virallisuus ja käyttökelpoisuus parannetun suunnitteluohjeen laadinnassa. Tutkittavien tasorakenteiden murtotavat tulee määrittää ennen koekuormitusta laskennallisesti, millä varmistetaan, ettei kuormituksen aikana tapahtu äkillisiä työturvallisuutta vaarantavia muodonmuutoksia, kuten levyjen lommahamisesta tapahtuvaa stabiliteetin menetystä.

Koekuormituksia tulee tehdä sekä tasorakenteille että tasoissa käytettäville liitin-jäykistyslevykokoonpanoille. Levyjäykistystasoille ei ole olemassa standardisoituja testimenetelmiä, jonka vuoksi näiden toteutuksessa tulee soveltaa levyjäykistysseinien testausstandardia (SFS-EN 594). Testattavien tasorakenteiden lukumäärä määritetään FEM-mallinnuksen tulosten analysoinnin perusteella. Tasorakenteiden laskennallisen tarkastelun mahdollistamiseksi tulee selvittää käytettävien jäykistyslevyjen kiinnitysliittimien kestävyysarvot. Liittimien kestävyys tulee testata liitin- ja levykohtaisesti standardin (SFS-EN 1380) mukaan. Koekuormitusten perusteella saadaan arvot liittimen leikkauskestävyydelle ja siirtymäkertoimelle, joiden mukaan tasorakenteiden laskennallinen tarkastelu voidaan suorittaa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Parannetun levyjäykistystasojen suunnitteluohjeen sisältö

Kehitystyön tuloksena olevan levyjäykistystasojen suunnitteluohjeen tulee sisältää sekä levyjäykistystasojen teoriataustat että näiden suunnittelemisessa tarvittavat mitoitusyhtälöt. Ohjeen tulee olla yksinkertainen ja helppokäyttöinen, suunnittelutarkkuudesta ja teoriaosuuden laajuudesta tinkimättä.

Levyjäykistystason teoreettinen toiminta tulee avata johdonmukaisesti suunnitteluprosessin kulkua noudattaen. Ohjeen alussa tulee esittää tason kuormitusperusteet ja erilaiset rakennemallit (jäykkä, osittain jäykkä ja joustava), sekä näiden erot jäykistysrakennekokonaisuuden toiminnassa. Rakennemallin määrittämisessä noudatettavien reunaehto- ja selkeät ja sekä laskennallisesti että kuormituskokeilla todennetut. Suunnittelussa tulee huomioida sekä yksiaukkoiset että jatkuvat ja monimuotoiset tasorakenteet. Tason jatkuvuuteen jäykistävien väliseinien tai muiden pystyjäykisteiden kohdalla tulee esittää toimintaperusteet ja huomioida näiden vaikutus jäykistysrakenteiden voimasuureisiin.

Jäykistystason sisäiset rakenneosat: jäykistyslevyt, reuna- ja päätypalkit ja näiden väliset voimasuureet tulee esittää sekä tasokuvana että vapaakappalekuvin. Rakenneosien suunnittelussa tarvittavat mitoitusyhtälöt tulee esittää selkeästi, perustuen Leskelän johtamiin lineaarisen kimmoteorian mukaisiin kaavoihin. Jäykistystason leikkauskestävyys tulee määrittää Leskelän suunnitteluohjeen mukaan, käyttäen esitettyjä kiinnitystapakertoimia. Tämän lisäksi ohjeeseen tulee sisällyttää levyjen leikkausjännitys- ja lommahdustarkastelu RIL 205-1-2017 mukaisella ehdolla 10, huomioiden leikkausjännityksen todellinen jakaantuminen poikkileikkauksessa. Reunapalkit tulee suunnitella kestäväksi taivutusmomentista aiheutuvat normaalivoimat nykyisten ohjeiden mukaan. Palkkien jatkoksille tulee esittää suunnitteluperusteet ja rakenne-esimerkit.

Levyjäykistystason taipuma ja tämän raja-arvot erilaisille rakennus- ja rakennetyypeille tulee määrittää. Taipumassa tulee huomioida leikkausvoimasta, taivutusmomentista ja reunapalkkien jatkoksien liukumista aiheutuvat osataipumat. Leikkausvoimasta aiheutuvan osataipuman suuruus tulee määrittää Leskelän ohjeen mukaan. Taivutusmomentista aiheutuva osataipuma vaikutukset tulee määrittää RIL 205-1-2017:n mukaisella kaavalla 28. Reunapalkkien jatkoksien liukumista aiheutuva osataipuma tulee määrittää Yhdysvaltojen ja Kanadan ohjeissa esitetyllä osataipumalla (kaavat 38 ja 48).

Jäykistysrakenteiden välisten liitosten toteutuksesta tulee esittää suunnitteluperusteet ja rakenne-esimerkit, painottaen toimivan voimansiirtoreitin varmistamista jäykistysrakeneosilta perustuksille saakka. Rakenne-esimerkit tulee esittää tason reunoilta ja nurkista sekä puurunkoisille että muuratuille/betonisille seinärakenteille.

5.2 Loppuyhteenveto

Työssä tehtiin kattava kirjallisuuskatsaus tällä hetkellä käytössä oleviin kotimaisiin ja kansainvälisiin levyjäykistystasojen suunnitteluohjeisiin. Katsaukseen valittiin Suomessa nykyisin voimassa oleva puurakenteiden suunnittelustandardi SFS-EN 1995-1-1 ja tähän perustuva puurakenteiden suunnitteluohje RIL 205-1-2017. Kansainvälisistä lähteistä valittiin keskeisimmät englanninkieliset puurakenteiden suunnitteluohjeet, joihin oli sisällytetty levyjäykistystasojen suunnittelumenetelmät. Suunnitteluohjeiden sisältöä verrattiin Leskelän suunnittelumenetelmään (Leskelä 2005), jonka oli tarkoitus toimia sellaisenaan tulevan tutkimusprojektin teoriana. Lisäksi tehtiin suunnitteluohjeiden laskennallinen vertailu kahdella tasorakenteella, joiden tulosten eroja analysoitiin liitteessä 12.

Kirjallisuuskatsauksessa ja ohjeiden vertailussa havaittiin, että sekä nykyiset Suomessa käytössä olevat että Leskelän suunnittelumenetelmä vaativat kehittämistä tason rakenne-mallin, monimuotoisuuden, jatkuvuuden ja yksityiskohtien suunnittelun osalta. Yhdysvalloissa ja Kanadassa levyjäykistystason rakennemalli määritetään jäykäksi, osittain jäykäksi tai joustavaksi tasoksi raja-arvojen mukaan. Suomessa nykyisin käytössä olevat ja Leskelän suunnitteluohje olettavat tasot joustaviksi, mikä voi tietyissä tapauksissa johtaa epävarmalla puolella oleviin jäykistysrakenteiden voimasuureisiin. Joustava taso jakaa kuormitukset pystyjäykisteille näiden vaikutusalojen mukaan, kun jäykän tason tapauksessa kuormitukset jaetaan pystyjäykisteiden jäykkyyksien suhteessa, huomioiden myös rakenteiden vääntövaikutukset. Osittain jäykän tason toimintamalli on jäykän ja joustavan tason välimuoto, minkä toiminnan tarkka määrittäminen on vaikeaa.

Suomen nykyiset ja Leskelän suunnitteluohje olettavat, että jäykistystasot ovat yksiaukkoisia ja suorakaiteen muotoisia. Monimuotoisemmissa rakennuksissa oletetaan, että tasot voidaan jakaa yksiaukkoisiksi suorakaiteiksi aukkojen tai rakennuksen muotojen mukaan. Liitoksien toteutus näillä lohkotuslinjoilla jätetään esittämättä, minkä vuoksi oletus epäjatkuvuudesta ja nivelellisestä liitoksesta pystyjäykisteisiin ei ole yksiselitteistä. Tason aukkojen reunavahvistuksiin ei oteta kantaa Suomen nykyisissä tai Leskelän suunnitteluohjeissa, mutta Yhdysvalloissa ja Kanadassa on esitetty näille vahvistusperusteet.

Havaitut levyjäykistystasojen ongelmakohdat vaativat lisätutkimusta. Tason rakennemallin mahdollistamiseksi on määritettävä reunaehdot, joiden mukaan suunnittelija tekee valintansa. Reunaehdoissa tulee huomioida sekä tason että tähän liittyvien pystyjäykisteiden ja näiden liitoksien vaikutus rakennekokonaisuuden toimintaan. Lisäksi tulee määrittää aukkojen reunavahvistuksien suunnitteluperusteet. Järkevä lähestymismalli näiden selvittämiseen on FEM-mallintaminen, jolla voidaan taloudellisesti tutkia riittävä

määrä erilaisia jäykistystasorakennekokonaisuuksia liitoksineen. Analysoitavia tasokonaisuuksia on arvioitu liitteessä 11. Tulosten analysoinnin perusteella tulee suunnitella koekuormitusjärjestelyt, joilla määritetyt reunaehdot ja teoriat todennetaan.

Tämän diplomityön tavoitteena oli muodostaa lähtökohdat levyjäykistystasojen tutkimusprojektin toteutukseen. Työhön kerättiin saatavilla olevat teoriat ja paikannettiin sekä nykyisissä että Leskelän suunnitteluohjeessa olevat ongelmakohdat. Ongelmakohdat avattiin erityispiirteineen ja esitettiin näihin suositeltavat tutkimusmenetelmät. Tutkimusprojektin sisältö määräytyy näiden perusteella, joten tavoite saavutettiin.

LÄHTEET

ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. 2017. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers. 889 s. ISBN 978-0-7844-7996-4.

ASCE/SEI 41-17. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. 2017. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers. 623 s. ISBN 978-0-7844-8081-6.

Breyer, D. E. Cobeen, K. E. Fridley & K. J. Pollock, D. G. 2015. Design of Wood Structures – ASD/LRFD, Seventh Edition. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Professional. 1248 s. ISBN 9780071745604.

CSA O86-14. 2014. Engineering design in wood. Ontario, Kanada: Canadian Standards Association. 241 s. ISBN 978-1-77139-448-2.

Design of timber structures Volume 1. 2016. Tukholma, Ruotsi: Swedish Forest Industries Federation, Swedish Wood. 316 s. ISBN 978-91-980304-8-8.

Design of timber structures Volume 2. 2016. Tukholma, Ruotsi: Swedish Forest Industries Federation, Swedish Wood. 64 s. ISBN 978-91-980304-3-3.

Design of timber structures Volume 3. 2016. Tukholma, Ruotsi: Swedish Forest Industries Federation, Swedish Wood. 64 s. ISBN 978-91-980304-4-0.

Eurokoodi help desk. <<http://www.eurocodes.fi/>>. Viitattu 28.2.2018.

Guidelines for the Design of Horizontal Wood Diaphragms (ATC-7). 1981. Berkeley, USA: Applied Technology Council (ATC). 183 s.

Leskelä, J. 2005. Linear elastic design method for timber framed ceiling, floor and wall diaphragms. Licentiate's Thesis, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology. 120 s.

Leskelä, J. 1994. Puulevyjäykisteisen seinä- ja yläpohjarakenteen staattinen toiminta ja mitoitus. Diplomityö. Rakentamistekniikan osasto, Rakennetekniikan laboratorio, Oulun yliopisto. 82+10 s.

Puuinfo, Puutieto. <<https://www.puuinfo.fi/puutieto/sahatavara/vakiokoot-paksuudet-levyydet-ja-pituudet>>. Viitattu 9.4.2018

Research Report 138 – Plywood Diaphragms. 2000. Tacoma, USA: APA – The Engineered Wood Association. 59 s.

RIL 205-1-2017. 2017. Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 231 s. ISBN 978-951-758-604-7.

RIL julkaisut. <<http://www.ril.fi/fi/julkaisut.html>>. Viitattu 28.2.2018.

Salmi, T & Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy. 462 s. ISBN 978-952-9835-67-6.

SFS-EN 1995-1-1+A1+A2+AC. 2014. EUROKOODI 5. PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU. OSA 1-1: YLEISET SÄÄNNÖT JA RAKENNUKSIA KOSKEVAT SÄÄNNÖT. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, Rakennustuoteteollisuus RTT. 1+222 s.

SFS-EN 1380. 2009. TIMBER STRUCTURES. TEST METHODS. LOAD BEARING NAILS, SCREWS, DOWELS AND BOLTS. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, Rakennustuoteteollisuus RTT. 1+15 s.

SFS-EN 594. 2012. TIMBER STRUCTURES. TEST METHODS. RACKING STRENGTH AND STIFFNESS OF TIMBER FRAME WALL PANELS. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, Rakennustuoteteollisuus RTT. 1+17 s.

Special Design Provisions for Wind and Seismic 2015 Edition. 2015. Leesburg, USA: American Wood Council. 50 s. ISBN 978-1-940383-04-0.

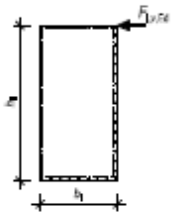
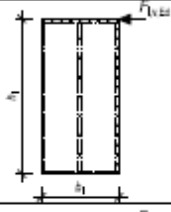
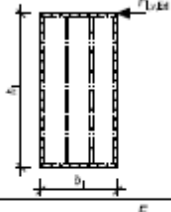
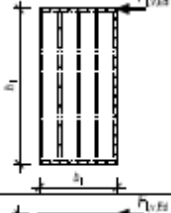
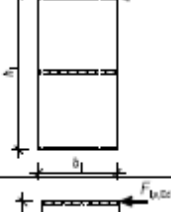
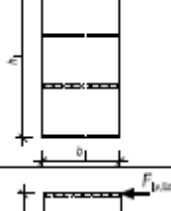
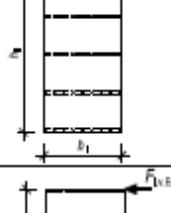
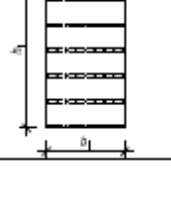
Swedish Wood Publications. <https://www.swedishwood.com/publications/list_of_swedish_woods_publications/design-of-timber-structures/>. Viitattu 28.2.2018.

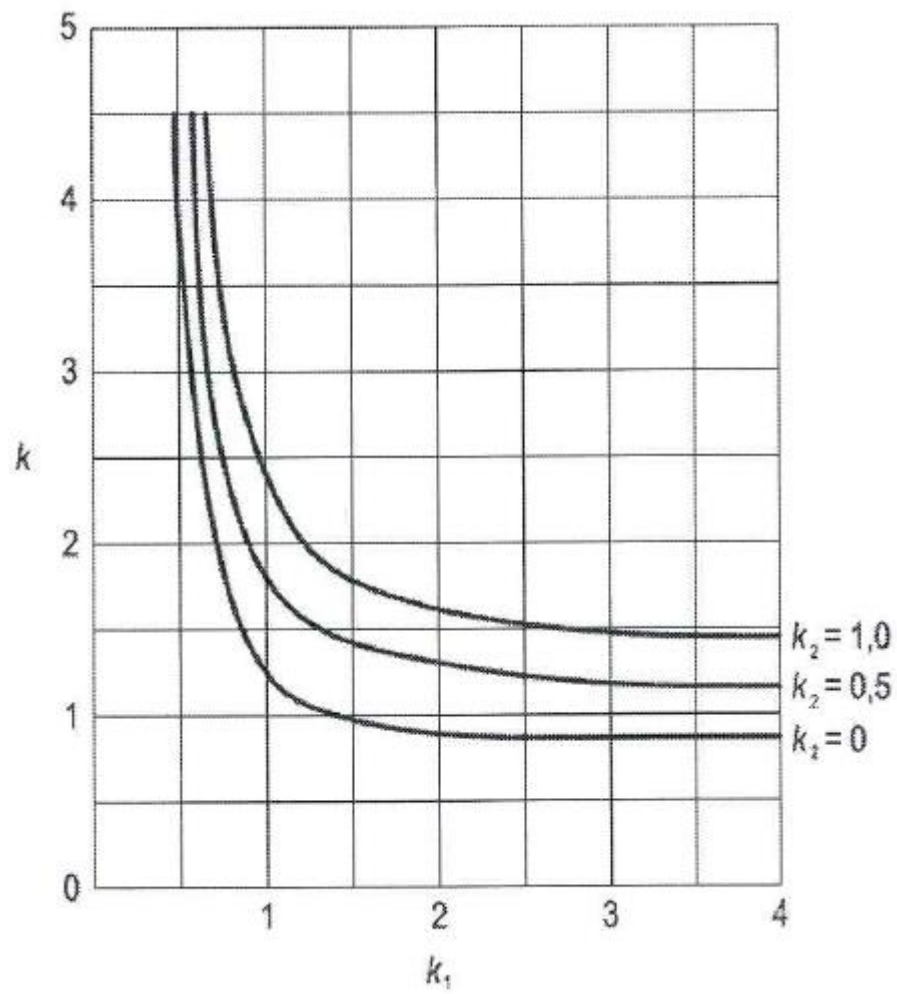
Wood Design Manual 2015. 2016. Ottawa, Kanada: Canadian Wood Council. 710 s. ISBN 978-0-9916862-6-1.

Ympäristöministeriö. Rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus. <http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus>. Viitattu 25.4.2018.

2015 International Building Code. 2014. U.S.A: International Code Council. 700 s. ISBN 978-1-60983-468-5

LIITE 1: RIL 205-1-2017 KIINNITYSTAPAKERTOIMET

Nro	Kiinnitystapa	γ -kerroin	β -kerroin
1		$\sqrt{\frac{9}{\left(3+\frac{h}{b}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{b}{h}+3\right)^2}}$	$\frac{6}{3\left(\frac{h}{b}\right)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)^3} + \frac{6}{1+3\left(\frac{h}{b}\right)}$
2		$\sqrt{\frac{4}{\left(2+\frac{h}{b}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{b}{h}+3\right)^2}}$	$\frac{4}{2\left(\frac{h}{b}\right)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)^3} + \frac{6}{1+3\left(\frac{h}{b}\right)}$
3		$\sqrt{\frac{9}{\left(3+2\frac{h}{b}\right)^2} + \frac{81}{\left(3\frac{b}{h}+10\right)^2}}$	$\frac{6}{3\left(\frac{h}{b}\right)^2 + 2\left(\frac{h}{b}\right)^3} + \frac{18}{3+10\left(\frac{h}{b}\right)}$
4		$\sqrt{\frac{36}{\left(6+5\frac{h}{b}\right)^2} + \frac{144}{\left(4\frac{b}{h}+15\right)^2}}$	$\frac{12}{6\left(\frac{h}{b}\right)^2 + 5\left(\frac{h}{b}\right)^3} + \frac{24}{4+15\left(\frac{h}{b}\right)}$
5		$\sqrt{4\left(\frac{h}{b}\right)^2 + 1}$	$\frac{2}{\left(\frac{h}{b}\right)^2} + 4$
6		$\sqrt{\frac{9}{4}\left(\frac{h}{b}\right)^2 + \frac{81}{100}}$	$\frac{9}{5\left(\frac{h}{b}\right)^2} + 3$
7		$\sqrt{\frac{36}{25}\left(\frac{h}{b}\right)^2 + \frac{16}{25}}$	$\frac{8}{5\left(\frac{h}{b}\right)^2} + \frac{12}{5}$
8		$\sqrt{\frac{36}{49}\left(\frac{h}{b}\right)^2 + \frac{81}{196}}$	$\frac{9}{7\left(\frac{h}{b}\right)^2} + \frac{12}{7}$

LIITE 2: RIL 205-1-2017 LOMMAHDUSKERROINKÄYRÄ

LIITE 3: ASCE/SEI 7-16 TAULUKKO 12.12-1, MUOKATTU

Table 12.12-1 Allowable Story Drift, $\Delta_a^{a,b}$

Structure	Risk Category		
	I or II	III	IV
Structures, other than masonry shear wall structures, four stories or less above the base as defined in Section 11.2, with interior walls, partitions, ceilings, and exterior wall systems that have been designed to accommodate the story drifts	$0.025h_{sx}^c$	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$
Masonry cantilever shear wall structures ^d	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$
Other masonry shear wall structures	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$
All other structures	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.010h_{sx}$

^a h_{sx} is the story height below level x.

^bFor seismic force-resisting systems solely comprising moment frames in Seismic Design Categories D, E and F, the allowable story drift shall comply with the requirements of Section 12.12.1.1

^cThere shall be no drift limit for single-story structures with interior walls, partitions, ceilings, and exterior wall systems that have been designed to accommodate the story drifts. The structure separation requirement of Section 12.12.3 is not waived.

^dStructures in which the basic structural system consists of masonry shear walls designed as vertical elements cantilevered from their base or foundation support that are so constructed that moment transfer between shear walls (coupling) is negligible.

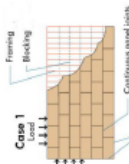
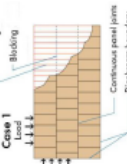
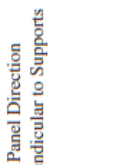
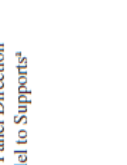
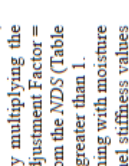
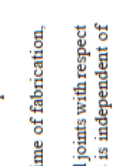
^dStructures in which the basic structural system consists of masonry shear walls designed as vertical elements cantilevered from their base or foundation support that are so constructed that moment transfer between shear walls (coupling) is negligible.

LIITE 4: SDPWS 2015 MITOITUSTAULUKKOESIMERKKI

Table 4.2A Nominal Unit Shear Capacities for Wood-Frame Diaphragms

Blocked Wood Structural Panel Diaphragms^{1,2,3,4,5}

A SEISMIC										B WIND										
Nail Spacing (in.) at diaphragm boundaries (all cases), at continuous panel edges parallel to load (Cases 3 & 4), and at all panel edges (Cases 5 & 6)																				
6						4					2-1/2					2				
Nail Spacing (in.) at other panel edges (Cases 1, 2, 3, & 4)																				
6						4					3					2				
V _e (plf)						G _s (kips/in.)					V _e (plf)					G _s (kips/in.)				
OSB						PLY					OSB					PLY				
Structural I	6d	370	15	12	500	8.5	7.5	750	12	10	840	20	15	1330	1175					
		420	12	9.5	560	7.0	6.0	840	9.5	8.5	950	17	13	1680	1890					
		540	14	11	720	9.0	7.5	1060	13	10	1200	21	15	2045	2295					
		600	12	10	800	7.5	6.5	1200	10	9.0	1350	18	13	2415	2665					
		640	24	17	850	15	12	1280	20	15	1460	31	21	3135	3435					
	10d	720	20	15	960	12	9.5	1440	16	13	1640	26	18	3360	3710					
		340	15	10	450	9.0	7.0	670	13	9.5	760	21	13	1510	1610					
		380	12	9.0	500	7.0	6.0	760	10	8.0	860	17	12	1710	1835					
		370	13	9.5	500	7.0	6.0	750	10	8.0	840	18	12	1810	1965					
		420	10	8.0	560	5.5	5.0	840	8.5	7.0	950	14	10	2010	2185					
Sheathing and Single-Floor	8d	480	15	11	640	9.5	7.5	960	13	9.5	1090	21	13	2110	2295					
		540	12	9.5	720	7.5	6.0	1080	11	8.5	1220	18	12	2310	2515					
		510	14	10	680	8.5	7.0	1010	12	9.5	1150	20	13	2415	2635					
		570	11	9.0	760	7.0	6.0	1140	10	8.0	1290	17	12	2615	2855					
		540	13	9.5	720	7.5	6.5	1060	11	8.5	1200	19	13	2715	2965					
	10d	600	10	8.5	800	6.0	5.5	1200	9.0	7.5	1350	15	11	2815	3085					
		580	25	15	770	15	11	1150	21	14	1310	33	18	3015	3305					
		650	21	14	860	12	9.5	1300	17	12	1470	28	16	3215	3525					
		640	21	14	850	13	9.5	1280	18	12	1460	28	17	3315	3635					
		720	17	12	960	10	8.0	1440	14	11	1640	24	15	3515	3845					

Cases 1 & 3: Continuous Panel Joints Perpendicular to Framing		Cases 2 & 4: Continuous Panel Joints Parallel to Framing		Cases 5 & 6: Continuous Panel Joints Perpendicular and Parallel to Framing	
Long Panel Direction Perpendicular to Supports	Long Panel Direction Parallel to Supports ^a	Long Panel Direction Perpendicular to Supports	Long Panel Direction Parallel to Supports ^a	Long Panel Direction Perpendicular to Supports	Long Panel Direction Parallel to Supports ^a
					

- Nominal unit shear capacities shall be adjusted in accordance with 4.2.3 to determine ASD allowable unit shear capacity and LRFD factored unit resistance. For general construction requirements see 4.2.6. For specific requirements, see 4.2.7.1 for wood structural panel diaphragms. See Appendix A for common nail dimensions.
- For species and grades of framing other than Douglas-Fir-Larch or Southern Pine, reduced nominal unit shear capacities shall be determined by multiplying the tabulated nominal unit shear capacity by the Specific Gravity Adjustment Factor = $[1 - (0.5 - G)]$, where G = Specific Gravity of the framing lumber from the *NDS* (Table 12.3.3A). The Specific Gravity Adjustment Factor shall not be greater than 1.
- Apparent shear stiffness values, G_s , are based on nail slip in framing with moisture content less than or equal to 19% at time of fabrication and panel stiffness values for diaphragms constructed with either OSB or 3-ply plywood panels. When 4-ply or 5-ply plywood panels or composite panels are used, G_s values shall be permitted to be multiplied by 1.2.
- Where moisture content of the framing is greater than 19% at time of fabrication, G_s values shall be multiplied by 0.5.
- Diaphragm resistance depends on the direction of continuous panel joints with respect to the loading direction and direction of framing members, and is independent of the panel orientation.

LIITE 5: WOOD DESIGN MANUAL 2015 MITOITUSTAULUK-KOESIMERKKI

Wood-based

Panel: DFP

Factored Shear Resistance $v_{rd}^{1,2,6}$ (kN/m)

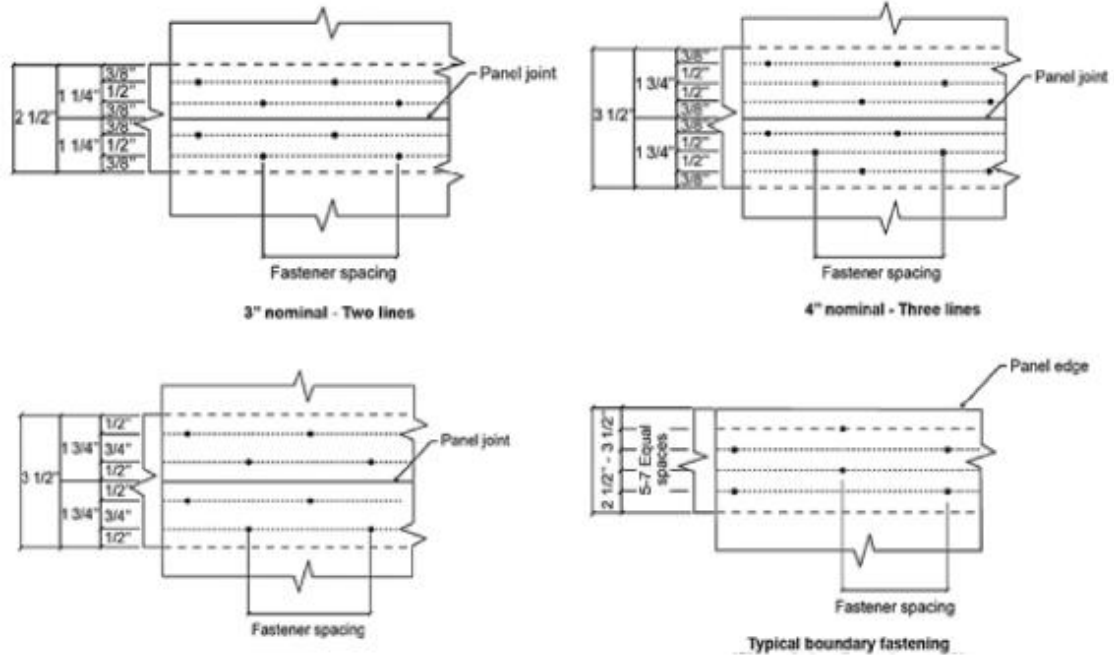
Stud species	Common nail size		Panel thickness (mm)	Panels applied directly to framing Nail spacing at panel edges (mm)				Panel buckling strength ⁵ (kN/m)
	Length (in.)	Diameter (mm)		150	100	75	50**	
D.Fir-L	2-1/4	2.52**	7.5	3.34	4.96	6.32	8.20	5.21
			9.5	3.65	5.42	6.90	8.95	9.36
			12.5	4.11	6.10	7.77	10.1	25.1
			15.5	4.38	6.51	8.29	10.8	38.7
	2	2.84	7.5	3.96	5.88	7.49	9.72	5.21
			9.5	4.29	6.37	8.12	10.5	9.36
			12.5	4.79	7.11	9.05	11.8	25.1
			15.5	5.28	7.85	9.99	13.0	38.7
			18.5	5.44	8.09	10.3	13.4	56.6
	2	2.87**	7.5	4.02	5.97	7.61	9.87	5.21
			9.5	4.35	6.47	8.23	10.7	9.36
			12.5	4.85	7.21	9.18	11.9	25.1
			15.5	5.35	7.95	10.1	13.1	38.7
			18.5	5.55	8.24	10.5	13.6	56.6
	2-1/2	3.25	7.5	4.80	7.12	9.07	11.8	5.21
			9.5	5.15	7.65	9.74	12.6	9.36
			12.5	5.69	8.45	10.8	14.0	25.1
			15.5	6.22	9.24	11.8	15.3	38.7
			18.5	6.76	10.0	12.8	16.6	56.6
	2-1/2	3.33**	7.5	4.96	7.37	9.38	12.2	5.21
			9.5	5.32	7.91	10.1	13.1	9.36
			12.5	5.86	8.71	11.1	14.4	25.1
			15.5	6.41	9.51	12.1	15.7	38.7
			18.5	6.95	10.3	13.1	17.1	56.6
	3	3.66*	7.5	5.66	8.41	10.7	13.9	5.21
			9.5	6.04	8.97	11.4	14.8	9.36
			12.5	6.60	9.81	12.5	16.2	25.1
			15.5	7.17	10.7	13.6	17.6	38.7
			18.5	7.74	11.5	14.6	19.0	56.6

Notes:

1. The factored shear resistance of diaphragms constructed with wood-based panels is the smaller of factored lateral resistance of sheathing-to-framing connection or panel buckling strength;
2. The tabulated diaphragm selection can be used for both wind design and seismic design when the panel buckling does not govern the design. When the panel buckling governs the lateral resistance the diaphragm is only appropriate for wind design;
3. Fastener row modification factor for blocked diaphragm, J_r , applies only to the factored lateral resistance of sheathing-to-framing connection;
4. Modification factor for unblocked diaphragm, J_{ud} , applies only to the factored lateral resistance of sheathing-to-framing connection;
5. The panel buckling strengths are based on the most commonly available plywood products or the minimum buckling strength for OSB panels of the same thickness; and the panel size is assumed to be 2440 mm x 1220 mm;

6. Use the same value as the thickest sheathing available in the tables for thicker sheathing, provided that the minimum fastener penetration requirement is satisfied.

7. For diaphragms with multiple rows of fasteners, framing members shall be at least 64 mm thick and 64 mm wide at boundaries or adjoining panel edges. The fasteners shall be placed along all the edges of each panel not less than 64 mm on centre and the minimum distance between rows is 9 mm. The fasteners between rows shall be staggered.



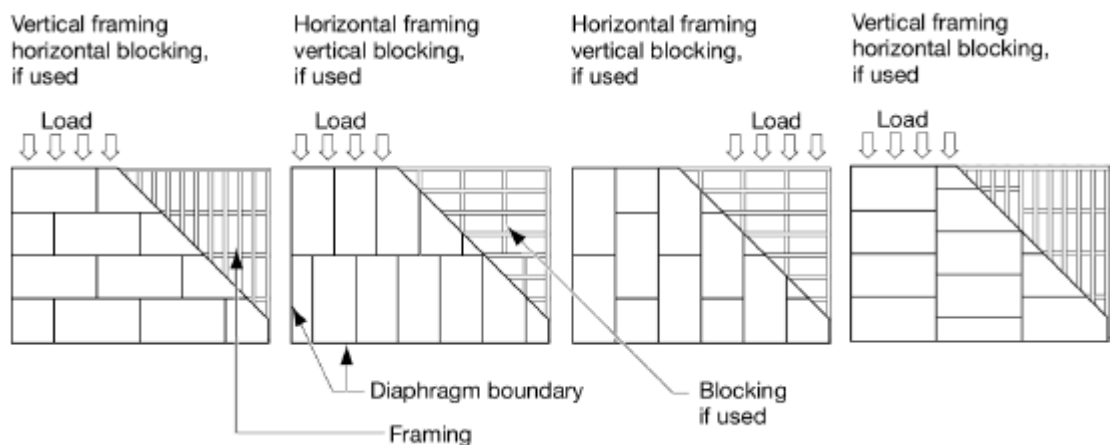
8. Fasteners along intermediate framing members shall not be greater than 300 mm on center.

9. For Construction Sheathing OSB, product specification also includes a panel mark identifying a end-use rating. Table 8.1 provides an equivalence between tabulated thickness and panel marks.

** where the fastener spacing at panel edges is 50 mm, framing at adjoining panel edges shall be 64 mm or thicker (or two 38 mm thick framing members connected to transfer the factored shear force), and the fasteners shall be staggered.

* where the fasteners of 3.66 mm diameter penetrate more than 41 mm into framing and are spaced 75 mm or less on centre, framing at adjoining panel edges shall be 64 mm or thicker (or two 38 mm thick framing members connected to transfer the factored shear force), and the fasteners shall be staggered.

++ indicates commonly used power driven nails.



LIITE 6: WOOD DESIGN MANUAL 2015 KIINNIKERIVIKERTOIMET

Fastener row factor, J_f , for blocked diaphragms

Number of rows	Minimum thickness of framing member, mm	J_f
1	38	0.89
	64*	1.00
2	64*	1.78
	89 ⁺	2.00
3	89 ⁺	2.67

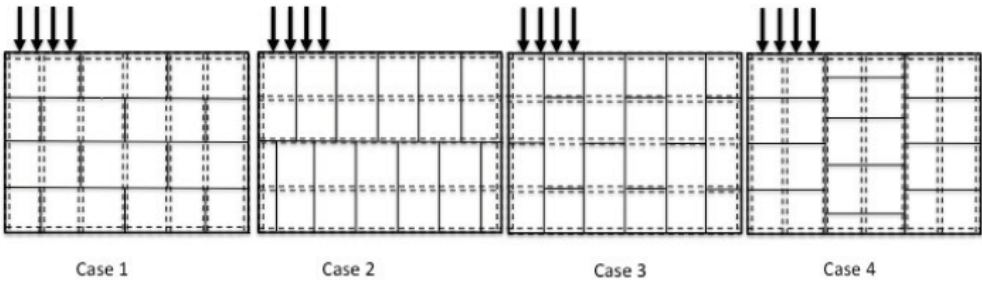
* Or two 38 mm thick members adequately connected to transfer the factored shear force.

⁺ Or three 38 mm thick members adequately connected to transfer the factored shear force.







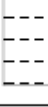





LIITE 7: WOOD DESIGN MANUAL 2015 LUJUUSKERTOIMET

Strength adjustment factor, J_{ud} , for unblocked diaphragms

Configuration case	J_{ud}
1	0.89
2, 3 and 4	0.67



LIITE 8: LESKELÄ 2005 KIINNITYSTAPAKERTOIMET

Fastening lay-out	Dimensions of a panel	$B \cdot H = 1200\text{mm} \cdot 2400\text{mm}$		$B \cdot H = 1200\text{mm} \cdot 2700\text{mm}$	
		Factor α [*10 ⁻⁵ /mm]	Factor β [*10 ⁻⁸ /mm ²]	Factor α [*10 ⁻⁵ /mm]	Factor β [*10 ⁻⁸ /mm ²]
1) 	$s=75\text{mm}$	2,722	5,017	2,409	4,336
	$s=100\text{mm}$	3,626	6,684	3,210	5,778
	$s=150\text{mm}$	5,428	10,00	4,805	8,648
2) 	$s=75\text{mm}$	2,592	4,817	2,297	4,175
	$s=100\text{mm}$	3,458	6,425	3,064	5,568
	$s=150\text{mm}$	5,189	9,639	4,597	8,351
3) 	$s=75\text{mm}$	2,341	4,357	2,071	3,771
	$s=100\text{mm}$	3,128	5,821	2,766	5,036
	$s=150\text{mm}$	4,709	8,759	4,162	7,573
4) 	$s=75\text{mm}$	2,105	3,920	1,859	3,387
	$s=100\text{mm}$	2,817	5,244	2,486	4,528
	$s=150\text{mm}$	4,253	7,914	3,749	6,826
5) 	$s=75\text{mm}$	9,053	16,57	8,983	16,14
	$s=100\text{mm}$	11,45	20,99	11,35	20,43
	$s=150\text{mm}$	15,52	28,55	15,38	27,74
6) 	$s=75\text{mm}$	6,898	12,73	6,824	12,35
	$s=100\text{mm}$	8,732	16,14	8,631	15,64
	$s=150\text{mm}$	11,87	21,99	11,71	21,26
7) 	$s=75\text{mm}$	5,584	10,35	5,512	10,01
	$s=100\text{mm}$	7,074	13,13	6,976	12,68
	$s=150\text{mm}$	9,630	17,90	9,479	17,25
8) 	$s=75\text{mm}$	4,054	7,538	3,989	7,262
	$s=100\text{mm}$	5,141	9,566	5,053	9,206
	$s=150\text{mm}$	7,012	13,06	6,878	12,54
9) 	$s=75\text{mm}$	3,185	5,931	3,129	5,702
	$s=100\text{mm}$	4,042	7,530	3,966	7,231
	$s=150\text{mm}$	5,521	10,29	5,404	9,856
10) 	$s=75\text{mm}$	3,468	6,189	2,944	5,159
	$s=100\text{mm}$	4,536	8,120	3,863	6,785
	$s=150\text{mm}$	6,559	11,80	5,617	9,909
11) 	$s=75\text{mm}$	2,888	5,273	2,476	4,432
	$s=100\text{mm}$	3,785	6,923	3,254	5,833
	$s=150\text{mm}$	5,490	10,08	4,744	8,528
12) 	$s=75\text{mm}$	2,473	4,555	2,131	3,846
	$s=100\text{mm}$	3,243	5,983	2,802	5,063
	$s=150\text{mm}$	4,713	8,715	4,092	7,407

LIITE 9: KIINNITYSTAPAKERTOIMIEN MUUNNOSKAAVAT

Jäykistyslevyjen kiinnitystapakertoimia käytetään lähteissä (RIL 205-1-2017) ja (Leskelä 2005). Kiinnitystapakertoimet eivät ole sellaisenaan vaihtokelpoisia suunnitteluohjeiden kesken, vaan näille täytyy johtaa muunnoskaavat. Muunnoskaavojen avulla voidaan myös arvioida laskentamenetelmien tuloksien eroja erilaisissa kiinnitystavoissa.

Tarkastellaan levyjäykistystasoa, jossa levyjen kiinnityssuunta on kohtisuoraan kuormituksen suuntaan nähden (esim. kuva 5). Tason leikkauskestävyyden määrittämisessä käytetään RIL 205-1-2017:ssä kiinnitystapakerrointa γ_i ja Leskelän suunnitteluohjeessa kerrointa α . RIL 205-1-2017 mukaan tason leikkauskestävyys $F_{i,v,Rd}$ määritetään kaavalla

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd,i} b_i}{\gamma_i s_i}, \quad (1)$$

missä

$F_{f,Rd,i}$ on levyn kiinnitysliittimen leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo

b_i on levyn leveys

s_i on levyn kiinnitysliittimien jakoväli. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.3S)

Leskelän suunnitteluohjeessa määritetään levyjäykistystason liittimissä vaikuttava maksimileikkausvoima F_{max} kaavalla

$$F_{max} = \frac{\alpha H L w}{2n}, \quad (2)$$

missä

H on levyn korkeus

L on tason jänneväli

w on tason tasainen kuorma

n on jäykistyslevyjen lukumäärä kuormituksen suunnassa. (Leskelä 2005, kaava 3.30)

Yhtälöt eivät ole sellaisenaan vertailtavassa muodossa. Muokataan yhtälö 1 kaavaksi 3, jolla ratkaistaan tason yksittäisessä liittimessä vaikuttava leikkausvoima, jonka jälkeen vertailu voidaan suorittaa.

$$F_{f,Rd,i} = \frac{F_{i,v,Rd} \gamma_i s_i}{b_i} \quad (3)$$

Määritetään yhtälöt 2 ja 3 yhtä suuriksi.

$$F_{max} = F_{f,Rd,i}$$

$$\frac{\alpha HLw}{2n} = \frac{F_{i,v,Rd} \gamma_i s_i}{b_i} \quad (4)$$

Todetaan, että tarkasteltavassa levyssä vaikuttaa leikkausvoima

$$F_{i,v,Rd} = \frac{Q}{n} = \frac{Lw}{2n}. \quad (5)$$

Kun tämä sijoitetaan yhtälöön 4, saadaan

$$\begin{aligned} \frac{\alpha HLw}{2n} &= \frac{Lw \gamma_i s_i}{2n b_i} \\ \alpha H &= \frac{\gamma_i s_i}{b_i} \\ \alpha &= \frac{\gamma_i s_i}{b_i H} \end{aligned} \quad (6)$$

ja

$$\gamma_i = \frac{\alpha b_i H}{s_i} \quad (7)$$

RIL 205-1-2017 laskentamenetelmää voidaan nyt tarkentaa korvaamalla kiinnitystapakerroin γ_i yhtälöllä 7.

Leikkausvoimasta aiheutuva levyjäykistystason taipuma on RIL 205-1-2017:ssa riippuvainen kiinnitystapakertoimesta β_i ja Leskelän suunnitteluohjeessa kertoimesta β . Taipuman suuruus määritetään RIL 205-1-2017:n mukaan kaavalla

$$\omega_{i,v} = \frac{F_{i,v,Ek}}{C_{i,v}}, \quad (8)$$

missä

$F_{i,v,Ek}$ on yksittäistä levyä kuormittava vaakavoima käyttörajatilassa
 $C_{i,v}$ on yksittäisen levyn jäykkyyskerroin. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.4S)

Jäykkyyskerroin sisältää kiinnitystapakertoimen β_i kaavan 9 mukaan.

$$C_{i,v} = \frac{1}{\beta_i \frac{s_i h_i^2}{K_{ser,i} b_i^3} + \frac{h_i}{b_i G_{mean,i} t_i}} \quad (9)$$

missä

h_i on levyn korkeus
 t_i on levyn paksuus
 $G_{mean,i}$ on levyn liukumoduuli (paneelileikkaus)

$K_{ser,i}$ on liittimen siirtymäkerroin. (RIL 205-1-2017, kaava 9.00.1S)

Kun yhtälö 9 sijoitetaan kaavaan 8, saadaan

$$\omega_{i,v} = F_{i,v,Ek} \left(\beta_i \frac{s_i h_i^2}{K_{ser,i} b_i^3} + \frac{h_i}{b_i G_{mean,i} t_i} \right). \quad (10)$$

Leskelän suunnitteluohjeen mukaan taipuma määritetään kaavalla

$$u = \left(\beta \frac{H^2}{K} + \frac{H}{tBG} \right) \frac{mLw}{4n} \quad (11)$$

missä

K on levyn kiinnitysliittimen siirtymäkerroin

t on levyn paksuus

G on levyn liukumoduuli

m on puolet levyjen lukumäärästä tason pituussuunnassa. (Leskelä 2005, kaava 3.33)

Määritetään yhtälöt 10 ja 11 yhtä suuriksi.

$$\omega_{i,v} = u$$

$$F_{i,v,Ek} \left(\beta_i \frac{s_i h_i^2}{K_{ser,i} b_i^3} + \frac{h_i}{b_i G_{mean,i} t_i} \right) = \left(\beta \frac{H^2}{K} + \frac{H}{tBG} \right) \frac{mLw}{4n}$$

Kun todetaan, että $F_{i,v,Ek} = \frac{mLw}{4n}$, saadaan yhtälö supistettua muotoon

$$\beta_i \frac{s_i}{b_i^3} = \beta \quad (12)$$

ja

$$\beta_i = \frac{\beta b_i^3}{s_i}. \quad (13)$$

RIL 205-1-2017 laskentamenetelmää voidaan nyt tarkentaa korvaamalla kiinnitystapakerroin β_i yhtälöllä 13. Taulukkoon 4 on koottu RIL 205-1-2017 laskentamenetelmän muunnoskaavat.

Taulukko 4: RIL 205-1-2017 kiinnitystapakertoimien muunnoskaavat

Kuormituskestävyys	Siirtymä
$\gamma_i = \frac{\alpha b_i H}{s_i}$	$\beta_i = \frac{\beta b_i^3}{s_i}$

LIITE 10: YHTEENVETO SUUNNITTELUYHTÄLÖISTÄ

	Leikkauskestävyys	Leikkausjännityskestävyys	Lommahduskestävyys	Reunapalkkien rasi- tukset	Siirtymä
EN 1995-1-1	$R = q = \frac{R_v 2b}{l_s}$	-	-	$N_d = M_d/b$	-
RIL205-1-2017	$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd,i} b_i}{\gamma_i S_i}$	$\tau_{d,i} = \frac{1,5 F_{i,v,Ed}}{b_i t_i} \leq f_{v,d,i}$	$\tau_{d,i} = \frac{1,5 F_{i,v,Ed}}{b_i t_i} \leq f_{v,crit,i}$	$N_{c,Ed} = N_{t,Ed} = \frac{\max M_d}{d}$	$\omega = \frac{\omega_{i,1} + \omega_{i,2} + \omega_{i,3} + \omega_{i,n}}{2} + \frac{5 M_k L^2}{24 d^2 A_p E_p}$
Ruotsi	$F_v = v s$	$\tau = v/t$	-	$T = C = \frac{M}{b} = \frac{w l^2}{8b}$	-
USA	Taulukkomitoitus	Taulukkomitoitus	Taulukkomitoitus	$N = \frac{M_{max}}{b}$	$\delta_{dia} = \frac{5 v L^3}{8 E A W} + \frac{0,25 v L}{1000 G_a} + \frac{\Sigma(\Delta_c x)}{2W}$ $\Delta = \frac{0,052 v L^3}{E A b} + \frac{v L}{4 G_i} + \frac{L e_n}{1627} + \frac{\Sigma(\Delta_c X)}{2b}$
Kanada	Taulukkomitoitus $V_{rd} = \varphi f_D f_s f_{ud} V_d$	Taulukkomitoitus	Taulukkomitoitus $V_{rd} = \varphi K_D K_S K_T V_{pb}$	$P_f = T_f = \frac{M_f}{h}$	$\Delta_d = \frac{5 v L^3}{96 E A L_D} + \frac{v L}{4 B_v} + 0,00061 L e_n + \frac{\Sigma(\Delta_c x)}{2 L_D}$
Leskelä 2005	$F_{max} = \frac{\alpha H L w}{2n}$ $F_{max} = \frac{\alpha B L w}{2n}$	-	-	$N_t(z) = N_c(z) = \frac{M(z)}{d} = \frac{(Lz - z^2)w}{2d}$	$u = \left(\beta \frac{H^2}{K} + \frac{H}{t B G} \right) \frac{m L w}{4n}$ $u = \left(\beta \frac{B^2}{K} + \frac{B}{t B G} \right) \frac{m L w}{4n}$

LIITE 11: SUUNNITTELUOHJEEN KEHITYKSESSÄ VAADITTAVAT FEM-ANALYYSIT

Alla oleviin taulukoihin 5-7 on koottu suunnitteluohjeen kehityksessä vaadittavien levyjäykistystasojen lähtötietoja ja analysoitavia tuloksia. Taulukoissa L on tason jänneväli, B on tason leveys, q on tason tasainen kuorma ja R on jäykistysrakenteen jäykkyys. Taulukot toimivat lisätutkimuksien lähtökohtana, mutta analysoitavien tapauksien lopullinen määrä selventyy vasta toteutusvaiheessa saatavien tuloksien mukaan.

Taulukkoon 5 on koottu yksiaukkoisen tason muotosuhteen vaikutuksen tutkimisessa vaadittavat tasotapaukset.

Taulukko 5: Yksiaukkoisen tason muotosuhteet

Muotosuhde (L/B)	Lähtötiedot			Analysoitavat tulokset	
	Vasen tukiarvo	Oikea tukiarvo	Kuormitus	Siirtymä	Jännitykset
1	Nivel	Nivel	q		
1,5	Nivel	Nivel	q		
2	Nivel	Nivel	q		
3	Nivel	Nivel	q		
4	Nivel	Nivel	q		
5	Nivel	Nivel	q		
6	Nivel	Nivel	q		
7	Nivel	Nivel	q		

Muotosuhteet on valittu standardin SFS-EN 1995-1-1 yksinkertaisessa analyysissä esitettyjen mittasuhteiden mukaan (kaava 1). Eurokoodi mahdollistaa muotosuhteiden 2...6 mukaisten jäykistystasojen suunnittelun, mutta ei ota kantaa muihin tapauksiin. Tavoitteena on tutkia eurokoodin muotosuhderajojen ulkopuolelle asettuvien tasotapauksien eroavaisuuksia verrattuna rajojen mukaisiin tapauksiin.

Taulukkoon 6 on koottu kaksiaukkoisen jäykistystason muotosuhteiden ja pystyjäykisteiden jäykkyyksien vaikutusten analysoinnissa vaadittavat tapaukset. Tason kuormitus tulee olla vakio ja tuennat pystyjäykisteisiin nivelellisiä. Tavoitteena on selvittää muotosuhteiden vaikutus jäykistysrakennetekonaisuuden toimintaan. Oleellista on tutkia erilaisia taso-pystyjäykistetekonaisuuksia, joihin päästään muuttamalla tason muotosuhdetta ja pystyjäykisteiden jäykkyysarvoja. Oletettavaa on, että jäykemmällä tasolla (pieni muotosuhde) pystyjäykisteiden kuormitukset poikkeavat verrattuna rakennekokonaisuuksiin joissa tasot ovat joustavampia (suuri muotosuhde). Tuloksia analysoimalla saadaan selville jäykistysrakenteiden suhteellisten jäykkyyksien vaikutukset tason toimintaan ja rakennemalliin.

Taulukko 6: Kaksiaukkoisen tason muotosuhteiden ja pystyjäykisteiden jäykkyyksien vaikutus jäykistysrakennekokonaisuuteen

Lähtötiedot				Analysoitavat tulokset							
Muotosuhde	Pystyjäykisteiden jäykkyydet			Pystyjäykisteiden voimat			Pystyjäykisteiden siirtymät			Taso	
L/B	Vasen	Keski	Oikea	Vasen	Keski	Oikea	Vasen	Keski	Oikea	Jännitykset	Siirtymät
1	R	R	R								
1	R	R/2	R								
1	R/2	R	R								
1,5	R	R	R								
1,5	R	R/2	R								
1,5	R/2	R	R								
2	R	R	R								
2	R	R/2	R								
2	R/2	R	R								
3	R	R	R								
3	R	R/2	R								
3	R/2	R	R								
4	R	R	R								
4	R	R/2	R								
4	R/2	R	R								
5	R	R	R								
5	R	R/2	R								
5	R/2	R	R								
6	R	R	R								
6	R	R/2	R								
6	R/2	R	R								
7	R	R	R								
7	R	R/2	R								
7	R/2	R	R								

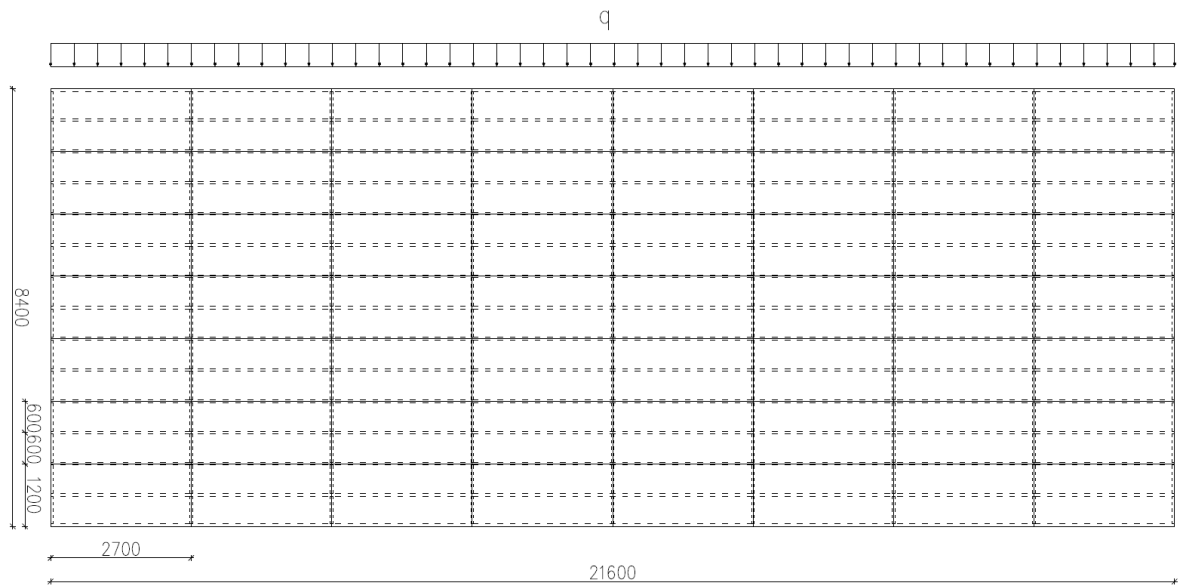
Taulukkoon 7 on koottu yksiaukkoisen jäykistystason aukotuksen vaikutuksen analysoinnissa vaadittavat tapaukset. Taulukon lähtötiedoissa oleva aukon koko määritetään levyjäykistystason pinta-alasta annetuilla prosenttiarvoilla. Aukon keskipisteen sijainti määritetään tason jännevälän mukaan. Tavoitteena on määrittää aukkojen vaikutukset tasoihin, joiden mukaan määritetään aukkojen reunavahvistustarpeet. Tason kuormituksen tulee olla vakio ja tuennat pystyjäykisteisiin nivelellisiä. Muuttujina toimivat tason muotosuhde sekä aukon koko ja sijainti jäykistystasossa. Tutkittavia aukkokokoja on valittu laajalta skaalalta näiden todellisten suuruksien vaihtelun vuoksi. Aukkojen maksimisuuruus on määritetty standardin (ASCE/SEI 7-16 2017) mukaan, jossa taso luokitellaan epäjatkuvaaksi, mikäli tässä on aukko, jonka pinta-ala on yli 50% koko tason pinta-alasta. Suurena aukkona voidaan pitää esimerkiksi hissikuilua, pienemmät aukot konkretisoituvat esimerkiksi talotekniikan läpivienteinä. Aukkojen sijainnit on valittu pisteisiin, joissa yksiaukkoisen taso saavuttaa taivutusmomentin ja leikkausvoiman huippuarvot (L/2 ja L).

Taulukko 7: Yksiaukkoisen tason aukotus

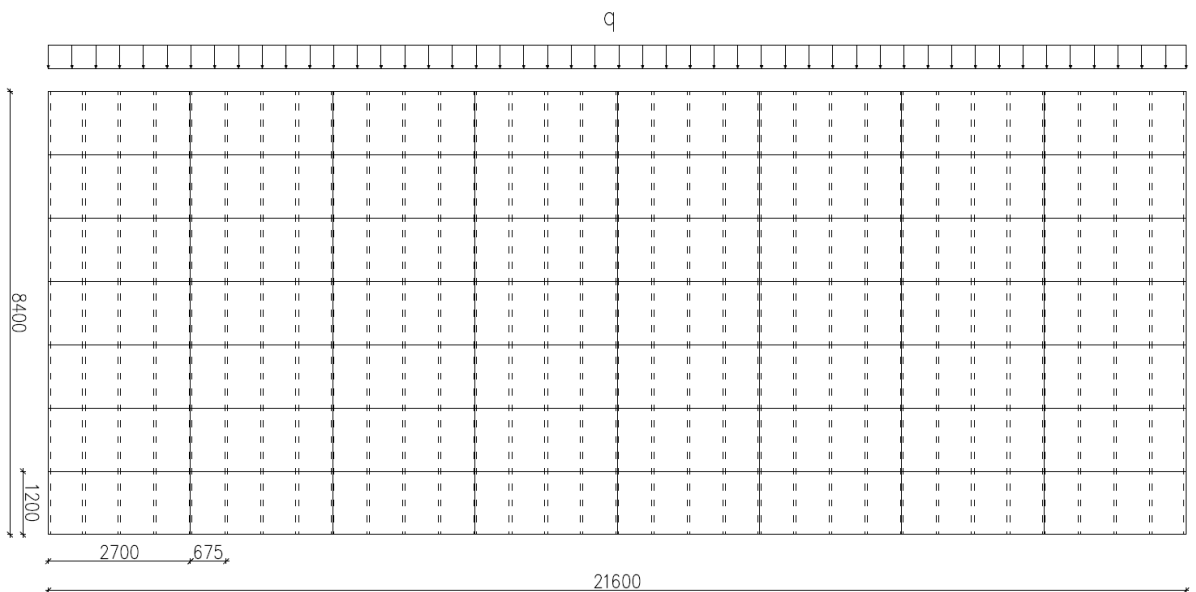
Lähtötiedot			Analysoitavat tulokset	
Muotosuhde	Aukko			
L/B	Koko	Sijainti	Siirtymä	Jännitykset
1	5 %	L/2		
1	5 %	L		
1	25 %	L/2		
1	25 %	L		
1	50 %	L/2		
1	50 %	L		
2	5 %	L/2		
2	5 %	L		
2	25 %	L/2		
2	25 %	L		
2	50 %	L/2		
2	50 %	L		
3	5 %	L/2		
3	5 %	L		
3	25 %	L/2		
3	25 %	L		
3	50 %	L/2		
3	50 %	L		
4	5 %	L/2		
4	5 %	L		
4	25 %	L/2		
4	25 %	L		
4	50 %	L/2		
4	50 %	L		
5	5 %	L/2		
5	5 %	L		
5	25 %	L/2		
5	25 %	L		
5	50 %	L/2		
5	50 %	L		
6	5 %	L/2		
6	5 %	L		
6	25 %	L/2		
6	25 %	L		
6	50 %	L/2		
6	50 %	L		
7	5 %	L/2		
7	5 %	L		
7	25 %	L/2		
7	25 %	L		
7	50 %	L/2		
7	50 %	L		

LIITE 12: SUUNNITTELUOHJEIDEN LASKENNALLINEN VERTAILU

Suunnitteluohjeita vertaillaan kahdella tasotapauksella. Tason mittasuhteet, kuormitus ja rakenneosien ominaisuudet pidetään vakioina. Levyjen kiinnitystapa ja kiinnitysrungon suunta muutetaan toiseen tasotapaukseen. Ensimmäisessä tasotapauksessa käytetään suljettua kiinnitystapaa, eli liittimet sijaitsevat levyn kaikilla reunoilla. Levyjen kiinnitysrunkona käytetään kattoristikoihin kiinnitettyjä ruoteita, joiden k-jako on 600 mm alla olevan tasokuvan mukaan.



Toisessa tasotapauksessa käytetään avointa kiinnitystapaa, eli osalla levyjen reunoista ei ole kiinnityслиittimiä. Levyjen kiinnitysrunkona käytetään kattoristikoihin kiinnitettyjä ruoteita, mutta tässä tapauksessa näiden k-jako on 675 mm alla olevan tason mukaan.



LEVYJÄYKISTYSTASOJEN SUUNNITTELUOHJEIDEN LASKENNALLINEN VERTAILU: SULJETTU KIINNITYSTAPA NRO 2.

LÄHTÖTIEDOT:

Tason dimensiot ja kuormitukset

Jänneväli $L := 21600\text{mm}$

Leveys $B := 8400\text{mm}$

Käyttöluokka: 1

Kuorman aikaluokka: hetkellinen

Tuulikuorman mitoitusarvo $q := 4.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Yksinkertaistuksena samaa kuormituksen arvoa käytetään sekä rakenneosien että siirtymän määrittämiseen.

Tason leikkausvoiman maksimiarvo $V_d := \frac{q \cdot L}{2} = 43.2 \cdot \text{kN}$

Tason taivutusmomentin maksimiarvo $M_d := \frac{q \cdot L^2}{8} = 233.28 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Tason reunapalkkien ominaisuudet

Reunapalkkina käytetään tasoa tukevan rankaseinän yläjuoksua C24 50x175.

Muunnoskerroin $k_{\text{mod.C24}} := 1.1$

Materiaalin osavarmuusluku $\gamma_{\text{M.C24}} := 1.3$

Vetolujuuden ominaisarvo $f_{t.0.k.C24} := 14.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Vetolujuuden mitoitusarvo $f_{t.0.d.C24} := k_{\text{mod.C24}} \cdot \frac{f_{t.0.k.C24}}{\gamma_{\text{M.C24}}} = 12.269 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Kimmo-oduuli $E_{0.\text{mean.C24}} := 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Palkin poikkileikkauspinta-ala $A_{\text{palkki}} := 50\text{mm} \cdot 175\text{mm} = 8.75 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Levyjen kiinnitysrungon ominaisuudet

Kiinnitysrunkona käytetään ristikoiden alapaarteisiin kiinnitettyjä ruoteita C18 50x50

Ruoteiden k-jako $k_{\text{jako}} := 600\text{mm}$

Keskimääräinen tiheys $\rho_{\text{m.C18}} := 380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Muunnoskerroin $k_{\text{mod.C18}} := 1.1$

Materiaalin osavarmuusluku $\gamma_{\text{M.C18}} := 1.3$

Jäykistyslevyn ominaisuudet

Levytyyppi: OSB/3 15x1200x2700

Kiinnitystapa: suljettu

Paksuus $t_i := 15\text{mm}$

Leveys $b_i := 1200\text{mm}$

Pituus	$h_i := 2700\text{mm}$
Tiheys	$\rho_{k.OSB} := 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Keskimääräinen liukumoduuli (paneelileikkaus)	$G_{\text{mean}.i} := 1080 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Liukumoduulin ominaisarvo (paneelileikkaus)	$G_i := 0.85 \cdot G_{\text{mean}.i} = 918 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Keskimääräinen taivutuskimmomoduuli	$E_{m.0.\text{mean}} := 4930 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Taivutuskimmomoduulin ominaisarvo	$E_i := E_{m.0.\text{mean}} \cdot 0.85 = 4.191 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Paneelileikkaukslujuuden ominaisarvo	$f_{v.k} := 6.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Muunnoskerroin	$k_{\text{mod}.OSB} := 1.1$
Materiaalin osavarmuusluku	$\gamma_{M.OSB} := 1.2$
Paneelileikkaukslujuuden mitoitussarvo	$f_{v.d.i} := k_{\text{mod}.OSB} \cdot \frac{f_{v.k}}{\gamma_{M.OSB}} = 6.233 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Kiinnitysliittimen ominaisuudet

Liitintyyppi: esiporaamaton konenaula 2.8x50

Halkaisija	$d_{2.8} := 2.8\text{mm}$
Naulan halkaisijan ehto	$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } d_{2.8} < 0.5 \cdot t_1 = \text{"OK"} \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases}$
Liitinjako	$s_i := 100\text{mm}$
Apusuure	$\rho_m := \sqrt{\rho_{k.OSB} \cdot \rho_{m.C18}} = 457.165 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Siirtymäkerroin	$K_{\text{ser}.i} := \left(\frac{\rho_m}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} \cdot \frac{\left(\frac{d_{2.8}}{\text{mm}} \right)^{0.8}}{30} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 742.532 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Tunkeumasyyvyys runkoon	$t_2 := 50\text{mm} - 15\text{mm} = 35\text{mm}$
Tunkeumasyyvyden ehto	$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } t_2 > 12 \cdot d_{2.8} = \text{"OK"} \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases}$
Leikkauskestävyyden korotuskerroin	$k_\rho := \sqrt{\frac{\rho_{k.OSB}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 350}} = 1.254$

Puulevyn naulaliitoksen lisäkerroin	$k_l := \left(0.5 + \frac{t_i}{12d_{2.8}} \right) \cdot k_p = 1.186$
Liittimen ominaisleikkauskestävyys	$R_{k,2.8} := 120 \cdot \left(\frac{d_{2.8}}{\text{mm}} \right)^{1.7} \text{ N} = 690.796 \cdot \text{N}$
Liitoksen osavarmuusluku	$\gamma_{M,\text{liitos}} := 1.3$
Liittimen mitoitusleikkauskestävyys	$R_{d,2.8} := \frac{k_{\text{mod.OSB}}}{\gamma_{M,\text{liitos}}} \cdot k_l \cdot R_{k,2.8} \cdot \min \left(1, \frac{t_2}{12d_{2.8}} \right)$ $R_{d,2.8} = 693.481 \text{ N}$

Tason suunnittelu: EN 1995-1-1

Yksinkertaistetun analyysin ehdot

Muotosuhde	$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } 2 \leq \frac{L}{B} \leq 6 \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$
Levyjen on kiinnitystapa on suljettu (standardin kohta 10.8.1 täyttyy)	OK
Liittimet ovat standardin EN 14592 mukaisia nauvoja	OK
Suurin liitinjako levyjen reunoilla 150 mm, muilla kiinnityslinjoilla 300 mm.	OK

Tason leikkauskestävyyden määrittäminen

Tason päädyssä vaikuttava leikkausvoima pituusyksikköä kohden	$v := \frac{qL}{2 \cdot B} = 5.143 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Tason leikkauskestävyys	$R := R_{d,2.8} \cdot 2 \cdot \frac{B}{L \cdot s_i} = 5.394 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Käyttöaste	$K_{EN} := \frac{q}{R} = 0.742$

Lisäksi limittämällä levyt voidaan levyjen reunoilla liitinjakoa suurentaa kertoimella 1,5, (enintään mitta 150 mm) leikkauskestävyyttä pienentämättä.

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Palkeissa vaikuttava normaalivoima (veto)	$N_d := \frac{M_d}{B} = 27.771 \cdot \text{kN}$
Palkissa vaikuttava vetojännitys	$\sigma_{t,d} := \frac{N_d}{A_{\text{palkki}}} = 3.174 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Ehto	$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,0,d,C24}} \leq 1 \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$
Käyttöaste	$\frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,0,d,C24}} = 0.259$

Palkkien jatkoksia ei tässä yhteydessä määritetä, sillä menetelmä ei huomio niiden vaikutusta tason siirtymään tai kestävyysasteeseen.

Huomioitavaa:

Tason siirtymää ei määritetä.

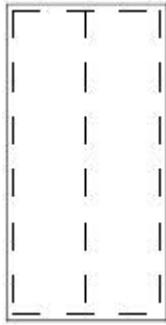
Levyn keskellä olevia kiinnitysrivejä ei huomioida.

Tason suunnittelu: RIL 205-1-2017

Tason leikkauskestävyyden määrittäminen

Levyjen kiinnitystapa nro 2.

Kiinnitystapakertoimet:



Yksittäisen levyn jäykkyyserroin

$$\beta_i := \frac{4}{2 \cdot \left(\frac{h_i}{b_i}\right)^2 + \left(\frac{h_i}{b_i}\right)^3} + \frac{6}{1 + 3 \cdot \left(\frac{h_i}{b_i}\right)} = 0.96$$

$$\gamma_i := \sqrt{\frac{4}{\left(2 + \frac{h_i}{b_i}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{b_i}{h_i} + 3\right)^2}} = 0.99$$

$$C_{i,v} := \frac{1}{\beta_i \cdot \left(s_i \cdot \frac{h_i^2}{K_{ser,i} \cdot b_i^3} + \frac{h_i}{b_i \cdot G_{mean,i} \cdot t_i} \right)}$$

$$C_{i,v} = 1.473 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

Levyjonoissa olevien levyjen lukumäärä $n := 7$

Tässä tapauksessa jonossa olevat levyt ovat identtisiä.

Jonon jäykkyyserroimien
summa

$$C_v := n \cdot C_{i,v} = 1.031 \times 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

Levyjonoa kuormittava
vaakavoima tason päädyssä

$$F_{v,Ed} := V_d = 43.2 \cdot \text{kN}$$

Yksittäistä levyä kuormittava
vaakavoima

$$F_{i,v,Ed} := \frac{C_{i,v}}{C_v} \cdot F_{v,Ed} = 6.171 \cdot \text{kN}$$

Kiinnitysluokan
leikkausvoimakestävyyden
mitoitussarvo

$$F_{f,Rd,i} := R_{d,2.8} = 693.481 \text{ N}$$

Tason leikkausvoimakestävyys

$$F_{i,v,Rd} := F_{f,Rd,i} \cdot \frac{b_i}{\gamma_i \cdot s_i} = 8.406 \cdot \text{kN}$$

Ehto

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{F_{i,v,Ed}}{F_{i,v,Rd}} \leq 1 \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Käyttöaste

$$K_{RIL} := \frac{F_{i,v,Ed}}{F_{i,v,Rd}} = 0.734$$

Leikkaus- ja lommahdustarkastelu

Levyn leikkausjännitys	$\tau_{d,i} := 1.5 \cdot \frac{F_{i,v} \cdot E_d}{b_i \cdot t_i} = 0.514 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$
Levyn tukien k-jako, pituussuunta	$a_i := 2700 \text{ mm}$
Levyn tukien k-jako, leveyssuunta	$c_i := 600 \text{ mm}$
Lommahdusapukerroin	$k_1 := \frac{c_i}{a_i} = 0.222$
Lommahdusapukerroin	$k_2 := 2 \cdot \frac{G_i}{E_i} = 0.438$
Lommahduskerroin käyrästä	$k := 4.5$
Kriittinen leikkausjännitys lommahduksen suhteen	$f_{v,crit,i} := 3.3 \cdot k \cdot E_i \cdot \left(\frac{t_i}{a_i} \right)^2 = 1.921 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$
Ehto	$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \tau_{d,i} \leq \min(f_{v,crit,i}, f_{v,d,i}) \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$
Käyttöaste	$\frac{\tau_{d,i}}{\min(f_{v,crit,i}, f_{v,d,i})} = 0.268$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.
Päädytään samaan lopputulokseen kuin EN 1995-1-1, ei toisteta tässä yhteydessä.
Palkkien jatkoksia ei määritetä, sillä menetelmä ei huomioi niiden vaikutusta tason siirtymään tai kestävyYTEEN.

Siirtymän määrittäminen

Tason keskimääräinen leikkausvoima	$Q_{\text{mean}} := \frac{q \cdot L}{4} = 21.6 \cdot \text{kN}$
Levyjonojen lukumäärä	$n_{\text{jono}} := 8$
Yksittäisen levyjonon siirtymä	$\omega_{i,jono} := \frac{Q_{\text{mean}}}{C_v} = 2.095 \cdot \text{mm}$
Leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä jännevälillä keskellä	$\omega_{\text{mean}} := \frac{n_{\text{jono}} \cdot \omega_{i,jono}}{2} = 8.379 \cdot \text{mm}$
Taivutusmomentista aiheutuva siirtymä	$\omega_m := \frac{(5 \cdot M_d \cdot L^2)}{24 \cdot B^2 \cdot A_{\text{palkki}} \cdot E_{0,\text{mean}} \cdot C_{24}} = 3.339 \cdot \text{mm}$
Tason kokonaissiirtymä jännevälillä keskellä	$\omega_{\text{tot}} := \omega_{\text{mean}} + \omega_m = 11.718 \cdot \text{mm}$

Tason suunnittelu: Ruotsi (Design of timber structures)

Tason leikkauskestävyyden määrittäminen

Tason päädyssä vaikuttava leikkausvoima pituusyksikköä kohden	$v := \frac{V_d}{B} = 5.143 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
---	---

Yksittäisessä liittimessä
vaikuttava leikkausvoima

$$F_v := v \cdot s_i = 514.286 \cdot \text{N}$$

Liittimen mitoitusleikkauskestävyys

$$R_{d.2.8} = 693.481 \text{ N}$$

Käyttöaste

$$K_{SWE} := \frac{F_v}{R_{d.2.8}} = 0.742$$

Leikkausjännityskestävyyden määrittäminen

Levyssä vaikuttava leikkausjännitys

$$\tau := \frac{v}{t_i} = 0.343 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Paneelileikkauslujuuden
mitoitusarvo

$$f_{v.d.i} = 6.233 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau}{f_{v.d.i}} = 0.055$$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Päädytään samaan lopputulokseen kuin EN 1995-1-1, ei toisteta tässä yhteydessä.
Palkkien jatkoksia ei määritetä, sillä menetelmä ei huomioi niiden vaikutusta tason
siirtymään tai kestävyysasteeseen.

Huomioitavaa:

Siirtymää ei määritetä.

Levyn keskellä olevia kiinnitysrivejä ei huomioida.

Lommahtamista ei tarkastella.

Leikkausjännityksen määrittämisessä ei huomioida jännityksen parabolista jakautumista
poikkileikkauksessa, jonka vuoksi arvo on pienempi kuin esim. RIL 205-1-2017
menetelmässä.

Tason suunnittelu: USA (Design of Wood Structures)

Siirtymän määrittäminen

Menetelmä 1: muotosuhdetarkastelu

Puurakenteiset, suljetulla kiinnitystavalla kiinnitetyt jäykistyslevyt

$$\text{Ehto} \quad \left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \quad \text{if } \frac{L}{B} \leq 4 \\ \text{"EI"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Menetelmän mukaan taipumaa ei tarvitse määrittää laskennallisesti.

Määritetään taipuman suuruus vertailun vuoksi toisella menetelmällä.

Reunapalkkien jatkokset

Menetelmässä huomioidaan reunapalkkien jatkoksien liukumien vaikutus tason siirtymään.

Valitaan jatkoksien määrä / palkki.
(6 m pitkä sahatavara)

$$n_{\text{jatkos}} := 3$$

Oletetaan, että kaikissa jatkoksissa vaikuttaa suurin reunapalkeissa vaikuttava vetovoima.
(Varman puolella oleva yksinkertaistus)

Käytettävä liitintyyppi: konenaula 3.1x90

Halkaisija $d_{3.1} := 3.1 \text{ mm}$

Tunkeumasyydydet $t_1 := 50 \text{ mm}$

$$t_2 := 90 \text{ mm} - t_1 = 40 \text{ mm}$$

Tunkeumasyydyden ehto
$$\begin{cases} \text{"KAAVA 8.5.1S"} & \text{if } \begin{cases} t_1 \geq 8 \cdot d_{3.1} \\ t_2 \geq 12 \cdot d_{3.1} \end{cases} \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"KAAVA 8.5.1S"}$$

Liittimen ominaisleikkauskestävyys $R_k := 120 \cdot \left(\frac{d_{3.1}}{\text{mm}} \right)^{1.7} \cdot \text{N} = 821.289 \text{ N}$

Sahatavaralla C24 $k_\rho := 1$

Korotuskerroin $k_{t,1} := \max \left[\left[1 + 0.3 \cdot \frac{(t_1 - 8 \cdot d_{3.1})}{8 d_{3.1}} \right], \left[1 + 0.3 \cdot \frac{(t_2 - 12 \cdot d_{3.1})}{6 \cdot d_{3.1}} \right] \right]$

$$k_{t,1} = 1.305$$

Rajoitus $k_t := \min(k_{t,1}, 1.1) = 1.1$

Liittimen mitoitusleikkauskestävyys $R_d := \frac{k_{\text{mod.C24}}}{\gamma_{\text{M.liitos}}} \cdot k_\rho \cdot k_t \cdot R_k = 764.431 \text{ N}$

Liitoksen naulamäärä $n := \frac{N_d}{R_d} = 36.33$

Valitaan $n := 40$

Yksittäiseen naulaan vaikuttava leikkausvoima $F_{\text{naula}} := \frac{N_d}{n} = 694.286 \text{ N}$

Yksittäisen jatkoksen liittimien liukuma
$$\Delta_c := \left[0.013 \cdot \frac{\left(\frac{F_{\text{naula}}}{\text{N}} \right)^2}{\left(\frac{d_{3.1}}{\text{mm}} \right)^2} \right] \text{ mm} = 0.882 \cdot \text{mm}$$

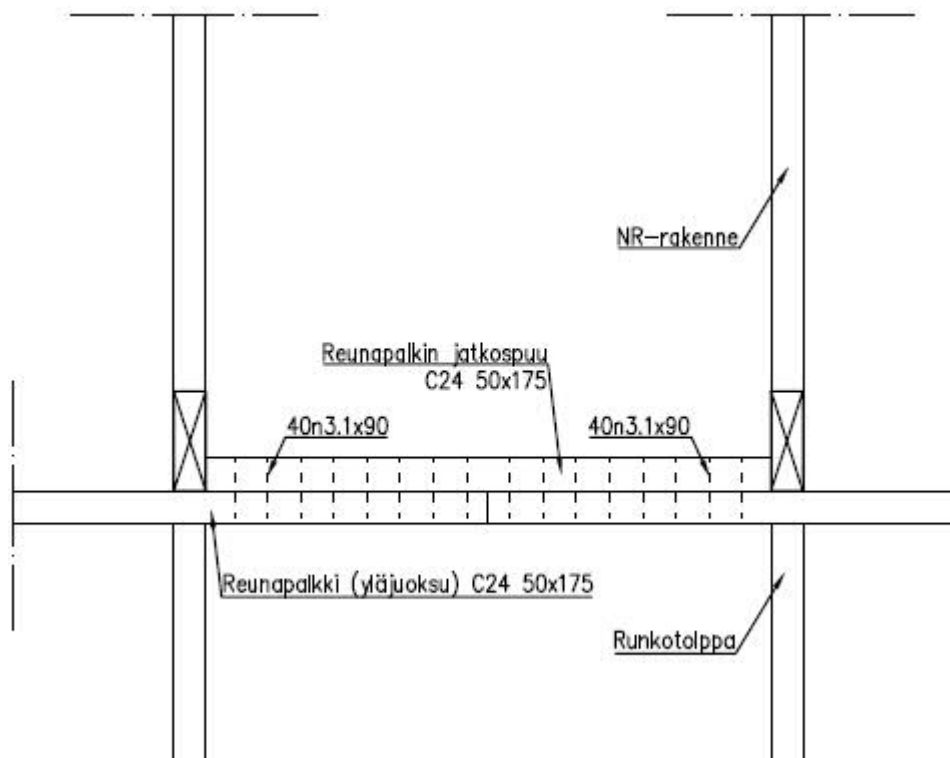
Jatkoksien etäisyydet tason päädyistä

Jatkos 1 ja 3 $x_{1,3} := 5.4 \text{ m}$

Jatkos 2 $x_2 := 2 \cdot 5.4 \text{ m} = 10.8 \text{ m}$

Mitoituksessa tulee huomioida jatkettavien reunapalkkien molemmat osat. Tässä tapauksessa otetaan huomioon vain vetopuolen jatkokset.

Reunapalkkien jatkoksien toteutus



Siirtymän määrittäminen:

Liukumoduuli levyn leikkausmuodonmuutoksesta ja liittimen liukumasta (taulukkoarvo)

$$G_a := 13 \frac{\text{kip}}{\text{in}}$$

Tason suurin leikkausvoima pituusyksikköä kohden

$$v = 5.143 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Siirtymä tason jännevälän keskellä

$$\delta_{\text{dia}} := 5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} + 0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{G_a} + \frac{[(2 \Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B}$$

$$\delta_{\text{dia}} = 17.805 \cdot \text{mm}$$

Avataan taipuman osakijät vertailun vuoksi:

Taivutusmomentista aiheutuva taipuma

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva taipuma

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{G_a} = 12.198 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien liukumista aiheutuva taipuma

$$\frac{[(2 \Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Leikkauskestävyyden määrittäminen

Tason leikkauskestävyys määritetään SDPWS 2015 taulukon 4.2A mukaan.

Taulukosta valitaan leikkauskestävyyden ominaisarvo annettujen reunaehtojen mukaan:

Valitaan levyn paksuudeksi
lähin mahdollinen arvo 19/32 in.

$$t := \frac{19}{32} \text{ in}$$

SI-yksikköinä

$$t = 15.081 \cdot \text{mm}$$

Valitaan liitinjako lähin
mahdollinen arvo 4 in.

$$s := 4 \text{ in}$$

SI-yksikköinä

$$s = 101.6 \cdot \text{mm}$$

Leikkauskestävyyden arvo luetaan taulukon B (wind) sarakkeesta,
kuormitustapauksille 5 ja 6 (Cases 5&6).

Tason leikkauskestävyyden ominaisarvo
pituusyksikköä kohden

$$v_w := 1190 \text{ plf}$$

SI-yksikköinä

$$v_w = 17.367 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Valitaan suunnitteluperusteeksi LRFD (Load and Resistance Factor Design), joka huomioi rakenteiden ja kuormitusten ominaisuuksia. HUOM! Suunnitteluperusteet ovat erilaiset kuin eurokoodistandardeissa, jonka vuoksi kestävyyden arvo ei ole suoraan vertailtavissa muihin menetelmiin.

Leikkauskestävyyden ominaisarvoa
tulee redusoida kertoimella

$$\phi_D := 0.80 \quad (\text{SDPWS 2015, luku 4.2.3})$$

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo
pituusyksikköä kohden

$$v_{w.d} := \phi_D \cdot v_w = 13.893 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Käyttöaste

$$K_{\text{USA}} := \frac{\frac{q \cdot L}{2B}}{v_{w.d}} = 0.37$$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Päädytään samaan lopputulokseen kuin EN 1995-1-1, ei toisteta tässä yhteydessä.

Huomioitavaa:

Tason leikkauskestävyyden arvo ei ole sellaisenaan verrattavissa eurokoodistandardien mukaisiin menetelmiin, sillä arvoa tulee redusoida suunnittelumenetelmästä riippuen erilaisilla kertoimilla. (ASD ja LRFD-menetelmät).

Tason kuormitustapaukset ovat rajallisia, minkä vuoksi kaikkien tasotyyppien mitoitus ei ole mahdollista.

Tason rakenneosien (levyt ja liittimet) dimensiot ovat USA:n mittayksiköissä, minkä vuoksi näissä on pieniä eroja verrattuna tason lähtötietojen SI-yksiköiden mukaisiin valintoihin. Esim. taulukon mukaan levyjen kiinnityksessä on käytetty 10d nauloja, jotka ovat n. 3,8 mm paksuja. Tämä on merkittävä ero alkuperäiseen valintaan.

Taulukoissa ei ole mahdollista huomioida erilaisia kiinnitysrunkomateriaaleja, millä on vaikutusta liitoksen kestävyteen.

Tason suunnittelu: Kanada (Wood design manual 2015)

Leikkauskestävyyden määrittäminen

Suunnitteluohje antaa reunaehdot, joiden toteutuessa voidaan kestävyysnäyttää suoraa taulukkoarvoa:

Kuoman aikaluokka lyhytkestoinen	OK, Kanadassa tuulikuorma kuuluu tähän luokkaan.
Käyttöolosuhde kuiva ja käytettävä puurunkomateriaali kuivattu ennen työstämistä alle 19% kosteuspitoisuuteen	OK
Materiaaleissa ei käytetä lujuutta heikentäviä kemikaaleja	OK
Liitinnivejä on yksi ja puurungon paksuus on 64 mm	EI
Levyjen kiinnitystapa on suljettu	OK

Taulukkoarvoa tulee muokata lisäkertoimilla.

Lujuuskerroin levyjäykistystasolle $\varphi := 0.80$

Liitinkerroin levyjäykistystasojen naulaliitoksille $J_D := 1.3$

Liitinjakokerroin $J_S := \begin{cases} 1 & \text{if } s_i \geq 150\text{mm} \\ \left[1 - \left[\frac{(150\text{mm} - s_i)}{150\text{mm}} \right]^{4.2} \right] & \text{if } 50\text{mm} \leq s_i < 150\text{mm} \end{cases}$

$$J_S = 0.99$$

Kiinnikerivikerroin kun yksi kiinnitysrivi/runko ja kiinnitysrungon paksuus min. 38mm $J_F := 0.89$

Lujuuskerroin levyille, joiden kiinnitystapa on avoin (tässä tapauksessa suljettu = 1.0) $J_{ud} := 1.0$

Määritetään leikkauskestävyyden arvo taulukosta (naulahalkaisija 2.84 mm):

Runkomateriaali $V_{d.1} := 7.06 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
D.Fir-L

Hem-Fir $V_{d.2} := 6.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

S-P-F $V_{d.3} := 6.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Northern $V_{d.4} := 6.42 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Suomalaisen sahatavaran C18 tiheys on lähimpänä Northern-puumateriaalia.

Tiheys, northern $\rho_{\text{northern}} := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Canadian Wood Council)

Leikkauskestävyys
pituusyksikköä kohden

$$V_{rd} := \varphi \cdot J_D \cdot J_s \cdot J_F \cdot J_{ud} \cdot V_{d.4} = 5.883 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Käyttöaste

$$K_{CAN} := \frac{\left(q \cdot \frac{L}{2 \cdot B} \right)}{V_{rd}} = 0.874$$

Lomahdustarkastelu taulukkoarvoilla:

Runkomateriaali

D.Fir-L $V_{rd.1} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Hem-Fir $V_{rd.2} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

S-P-F $V_{rd.3} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Northern $V_{rd.4} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Samat arvot runkomateriaalista riippumatta. Taulukoissa on oletettu levyn
pituudeksi 2440 mm ja leveydeksi 1220 mm, mikä vaikuttaa
lomahduskestävyyden arvoon. Havaitaan kuitenkin, että lomahdus ei tässä
tapauksessa tule mitoittavaksi tekijäksi.

Siirtymän määrittäminen:

Liittimen liukuma levyn
kiinnityksessä

$$e_n := \left[\frac{\left(0.013 \cdot \frac{v}{\frac{\text{N}}{\text{mm}}} \cdot \frac{s_i}{\text{mm}} \right)^2}{\left(\frac{d_{2.8}}{\text{mm}} \right)^2} \right] \cdot \text{mm} = 0.727 \cdot \text{mm}$$

Levyn liukumoduuli (shear though
thickness rigidity, CSA O86, table
9.3C)

$$B_v := 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Taipuma tason jännevälillä keskellä

$$\Delta_d := \frac{5 \cdot v \cdot L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} + 0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{B_v} \dots$$

$$+ \frac{0.00061}{\text{mm}} \cdot L \cdot e_n + \frac{\left[(2 \Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2 \right]}{2 \cdot B}$$

$$\Delta_d = 17.713 \cdot \text{mm}$$

Avataan taipuman osatekijät vertailun vuoksi:

Taivutusmomentista aiheutuva
taipuma

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva
taipuma

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{B_v} = 2.525 \cdot \text{mm}$$

Levyn kiinnityslittimien liukumista
aiheutuva taipuma

$$\frac{0.00061}{\text{mm}} \cdot L \cdot e_n = 9.582 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva taipuma

$$\frac{[(2\Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Päädytään samaan lopputulokseen kuin EN 1995-1-1, ei toisteta tässä yhteydessä.

Huomioitavaa:

Tason kuormitustapaukset ovat rajallisia, minkä vuoksi kaikkien tasorakenteiden suunnittelu ei ole mahdollista.

Tason suunnittelu: kimmoteoriaan perustuva suunnittelumenetelmä (Leskelä 2005)

Levykentän jakaantuminen:

Yksittäisten levyjen lukumäärä
tason leveyssuunnassa

$$n := 7$$

Puolet levyjen lukumäärästä tason
pituussuunnassa

$$m := 4$$

Levyt kiinnitetään kohtisuoraan kuormitukseen nähden kiinnitystavalla 2 (Liite 8).

Kiinnitystapakertoimet taulukosta:



$$\alpha := 3.064 \cdot \frac{10^{-5}}{\text{mm}}$$

$$\beta := 5.568 \cdot \frac{10^{-8}}{\text{mm}^2}$$

Liittimissä vaikuttavan
leikkausvoiman maksimiarvo

$$F_{\max} := \frac{\alpha \cdot h_i \cdot L \cdot q}{2 \cdot n} = 510.55 \cdot \text{N}$$

Liittimen mitoitusleikkauskestävyys

$$R_d := \frac{k_{\text{mod.OSB}}}{\gamma_{\text{M.liitos}}} \cdot k_l \cdot R_k \cdot \min \left(1, \frac{t_2}{12d_{2.8}} \right) = 693.481 \text{ N}$$

Käyttöaste

$$K_{\text{LESKELÄ}} := \frac{F_{\max}}{R_d} = 0.736$$

Siirtymän määrittäminen

Siirtymä tason jännevälin keskellä

$$u := \left(\beta \cdot \frac{h_i^2}{K_{\text{ser},i}} + \frac{h_i}{t_i \cdot B \cdot G_{\text{mean},i}} \right) \cdot \frac{m \cdot L \cdot q}{4 \cdot n} = 6.992 \cdot \text{mm}$$

Tuloksien vertailu

Leikkauskestävyys

Verrataan leikkauskestävyyksien käyttöasteita.

EN 1995-1-1	$K_{EN} = 0.742$
RIL 205-1-2017	$K_{RIL} = 0.734$
Ruotsi (Design of timber structures)	$K_{SWE} = 0.742$
USA (Design of Wood Structures)	$K_{USA} = 0.37$
Kanada (Wood design manual 2015)	$K_{CAN} = 0.874$
Kimoteoriaan perustuva suunnittelumenetelmä (Leskelä 2005)	$K_{LESKELÄ} = 0.736$

Johtopäätökset leikkauskestävyydestä:

Havaitaan, että EN 1995-1-1, RIL 205-1-2017, ja kimoteoriaan perustuva Leskelän suunnittelumenetelmä päätyvät lähes samaan käyttöasteeseen tarkastellulla tasotapauksella. Ruotsin Design of timber structures päätyy identtiseen tulokseen eurokoodin kanssa, koska mitoitusperuste on sama. Erona näiden välillä on ainoastaan leikkausjännitystarkastelu.

USA:n ohjetta ei voida sellaisenaan vertailla edeltäviin tuloksiin, sillä leikkauskestävyyden arvoa tulee redusoida suunnittelumenetelmän perusteella, jotka poikkeavat eurokoodistandardeista. Tämän diplomityön puitteissa suunnitteluperusteiden eroihin ei perehdytty laajuudella, jolla vertailu olisi mahdollista luotettavasti suorittaa.

Kanadan ohjeen tulos on vertailtavissa, sillä menetelmä antaa kestävyyksien arvot, eikä näitä tule redusoida. Havaitaan, että Kanadan ohjeella määritetty käyttöaste on korkeampi kuin Euroopassa käytettyjen menetelmien käyttöasteet.

Siirtymä:

Verrataan tason kokonaissiirtymiä sekä näiden osatekijöitä.

EN 1995-1-1	Ei määritetty
RIL 205-1-2017	
Taivutusmomentista aiheutuva siirtymä	$\omega_m = 3.339 \cdot \text{mm}$
Leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä jännevälän keskellä	$\omega_{\text{mean}} = 8.379 \cdot \text{mm}$
Tason kokonaissiirtymä jännevälän keskellä	$\omega_{\text{tot}} = 11.718 \cdot \text{mm}$
Ruotsi (Design of timber structures)	Ei määritetty
USA (Design of Wood Structures)	
Taivutusmomentista aiheutuva siirtymä	$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$

Leikkausvoimasta aiheutuva
siirtymä jännevälän keskellä

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{G_a} = 12.198 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva siirtymä

$$\frac{[(2\Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Tason kokonaissiirtymä
jännevälän keskellä

$$\delta_{\text{dia}} = 17.805 \cdot \text{mm}$$

Kanada (Wood design manual 2015)

Taivutusmomentista
aiheutuva siirtymä

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0,\text{mean}} \cdot C_{24} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva
siirtymä jännevälän keskellä

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{B_v} = 2.525 \cdot \text{mm}$$

Levyn kiinnitysluottimien liukumista
aiheutuva siirtymä

$$\frac{0.00061}{\text{mm}} \cdot L \cdot e_n = 9.582 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva siirtymä

$$\frac{[(2\Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Tason kokonaissiirtymä
jännevälän keskellä

$$\Delta_d = 17.713 \cdot \text{mm}$$

Kimmoiteoriaan perustuva
suunnittelumenetelmä (Leskelä 2005)

Leikkausvoimasta aiheutuva
siirtymä jännevälän keskellä
= tason kokonaissiirtymä

$$u = 6.992 \cdot \text{mm}$$

Johtopäätökset siirtymästä:

Kaikki ohjeet jotka sisältävät yhtälöt tason siirtymän määrittämiseen ovat vertailukelpoisia keskenään. Tämä rajaa EN 1995-1-1:n ja Ruotsin ohjeen vertailun ulkopuolelle. Havaitaan, että tason kokonaissiirtymissä on merkittäviä vaihteluja eri ohjeiden välillä. USA:n ja Kanadan ohjeet antavat suurimmat siirtymäarvot (17,805 mm ja 17,713 mm), Leskelän menetelmä pienimmän (6,992 mm). Ero näiden välillä on yli kaksinkertainen (255%). Analysoidaan kokonaissiirtymien eroja vertailemalla siirtymän osatekijöitä.

Taivutusmomentista aiheutuva osatekijä on yhtä suuri RIL 205-1-2017:n, USA:n ja Kanadan ohjeissa (3,339 mm). Leskelän suunnittelumenetelmä ei huomioi taivutusmomentin vaikutusta siirtymään.

Leikkausvoimasta aiheutuvaa osatekijää on vaikeampi vertailla, sillä tämän laskentaperusteet ja sisältö vaihtelevat suunnitteluohjeiden välillä. RIL 205-1-2017 menetelmässä osatekijä perustuu levyjen jäykkyysiin, kiinnitystapakertoimeen ja materiaalien ominaisuuksiin (8,379 mm). USA:n ohjeessa huomioidaan sekä levyn leikkausmuodonmuutos, että liittimen liukuma samassa osatekijässä käyttämällä näistä muodostettua liukumoduulia G_a .

Osatekijän suuruudeksi saadaan tällöin 12,198 mm. Kanadan ohjeessa leikkausvoima vaikuttaa kahteen osatekijään; levyn muodonmuutokseen ja levyn kiinnitysluottimien liukumaan. Kun nämä osatekijät summataan yhteen, päästään lähes samaan tulokseen (12,107 mm) kuin USA:n ohjeen osatekijällä. Leskelän suunnittelumenetelmässä leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä on ainoa osatekijä. Tämä perustuu levyjen kiinnitystapoihin ja materiaalien ominaisuuksiin (6,992 mm).

Reunapalkkien jatkoksien liukumasta aiheutuva osatekijä huomioidaan vain USA:n ja Kanadan ohjeessa, joissa tämä määritetään samoin perustein. Havaitaan, että osatekijän suuruusluokka (2,268 mm) on tässä tasotapauksessa lähellä taivutusmomentista aiheutuvaa osatekijää, jonka vuoksi tämä tulisi sisällyttää myös muihin suunnittelumenetelmiin.

LEVYJÄYKISTYSTASOJEN SUUNNITTELUOHJEIDEN LASKENNALLINEN VERTAILU: AVOIN KIINNITYSTAPA NRO 7.

LÄHTÖTIEDOT:

Tason dimensiot ja kuormitukset

Jänneväli $L := 21600\text{mm}$

Leveys $B := 8400\text{mm}$

Käyttöluokka: 1

Kuorman aikaluokka: hetkellinen

Tuulikuorman mitoitusarvo $q := 4.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Yksinkertaistuksena samaa kuormituksen arvoa käytetään sekä rakenneosien että siirtymän määrittämiseen.

Tason leikkausvoiman maksimiarvo $V_d := \frac{q \cdot L}{2} = 43.2 \cdot \text{kN}$

Tason taivutusmomentin maksimiarvo $M_d := \frac{q \cdot L^2}{8} = 233.28 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Tason reunapalkkien ominaisuudet

Reunapalkkina käytetään tasoa tukevan rankaseinän yläjuoksua C24 50x175.

Muunnoskerroin $k_{\text{mod.C24}} := 1.1$

Materiaalin osavarmuusluku $\gamma_{\text{M.C24}} := 1.3$

Vetolujuuden ominaisarvo $f_{t.0.k.C24} := 14.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Vetolujuuden mitoitusarvo $f_{t.0.d.C24} := k_{\text{mod.C24}} \cdot \frac{f_{t.0.k.C24}}{\gamma_{\text{M.C24}}} = 12.269 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Kimmo moduuli $E_{0.\text{mean.C24}} := 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Palkin poikkileikkauspinta-ala $A_{\text{palkki}} := 50\text{mm} \cdot 175\text{mm} = 8.75 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$

Levyjen kiinnitysrungon ominaisuudet

Kiinnitysrunkona käytetään ruoteita C18 50x50

Ruoteiden k-jako $k_{\text{jako}} := 675\text{mm}$

Keskimääräinen tiheys $\rho_{\text{m.C18}} := 380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Muunnoskerroin $k_{\text{mod.C18}} := 1.1$

Materiaalin osavarmuusluku $\gamma_{\text{M.C18}} := 1.3$

Jäykistyslevyn ominaisuudet

Levytyyppi: OSB/3 15x1200x2700

Kiinnitystapa: avoin

Paksuus $t_i := 15\text{mm}$

Leveys $b_i := 1200\text{mm}$

Pituus	$h_i := 2700\text{mm}$
Tiheys	$\rho_{k.OSB} := 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Keskimääräinen liukumoduuli (paneelileikkaus)	$G_{\text{mean}.i} := 1080 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Liukumoduulin ominaisarvo (paneelileikkaus)	$G_i := 0.85 \cdot G_{\text{mean}.i} = 918 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Keskimääräinen taivutuskimmomoduuli	$E_{m.0.\text{mean}} := 4930 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Taivutuskimmomoduulin ominaisarvo	$E_i := E_{m.0.\text{mean}} \cdot 0.85 = 4.191 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Paneelileikkauslujuuden ominaisarvo	$f_{v.k} := 6.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Muunnoskerroin	$k_{\text{mod}.OSB} := 1.1$
Materiaalin osavarmuusluku	$\gamma_{M.OSB} := 1.2$
Paneelileikkauslujuuden mitoitussarvo	$f_{v.d.i} := k_{\text{mod}.OSB} \cdot \frac{f_{v.k}}{\gamma_{M.OSB}} = 6.233 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Vetolujuuden ominaisarvo	$f_{t.0.k} := 9.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Vetolujuuden mitoitussarvo	$f_{t.0.d} := k_{\text{mod}.OSB} \cdot \frac{f_{t.0.k}}{\gamma_{M.OSB}} = 8.617 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Puristuslujuuden ominaisarvo	$f_{c.0.k} := 15.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Puristuslujuuden mitoitussarvo	$f_{c.0.d} := k_{\text{mod}.OSB} \cdot \frac{f_{c.0.k}}{\gamma_{M.OSB}} = 14.117 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Taivutuslujuuden ominaisarvo	$f_{m.0.k} := 16.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Taivutuslujuuden mitoitussarvo	$f_{m.0.d} := k_{\text{mod}.OSB} \cdot \frac{f_{m.0.k}}{\gamma_{M.OSB}} = 15.033 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Kiinnityслиittimen ominaisuudet

Liitintyyppi: esiporaamaton konenaula 2.8x50

Halkaisija	$d_{2.8} := 2.8\text{mm}$
Naulan halkaisijan ehto	$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } d_{2.8} < 0.5 \cdot t_i = \text{"OK"} \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Liitinjako	$s_i := 100\text{mm}$
------------	-----------------------

Apusuure	$\rho_m := \sqrt{\rho_{k.OSB} \cdot \rho_{m.C18}} = 457.165 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
----------	---

Siirtymäkerroin

$$K_{ser.i} := \left(\frac{\rho_m}{\frac{kg}{m^3}} \right)^{1.5} \cdot \frac{\left(\frac{d_{2.8}}{mm} \right)^{0.8}}{30} \cdot \frac{N}{mm} = 742.532 \cdot \frac{N}{mm}$$

Tunkeumasvyvyys runkoon

$$t_2 := 50mm - 15mm = 35mm$$

Tunkeumasvyvyyden ehto

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } t_2 > 12 \cdot d_{2.8} \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Leikkauskestävyyden korotuskerroin

$$k_\rho := \sqrt{\frac{\rho_{k.OSB}}{\frac{kg}{m^3} \cdot 350}} = 1.254$$

Puulevyn naulaliitoksen lisäkerroin

$$k_l := \left(0.5 + \frac{t_i}{12d_{2.8}} \right) \cdot k_\rho = 1.186$$

Liittimen ominaisleikkauskestävyys

$$R_{k.2.8} := 120 \cdot \left(\frac{d_{2.8}}{mm} \right)^{1.7} N = 690.796 \cdot N$$

Liitoksen osavarmuusluku

$$\gamma_{M.liitos} := 1.3$$

Liittimen mitoitusleikkauskestävyys

$$R_{d.2.8} := \frac{k_{mod.OSB}}{\gamma_{M.liitos}} \cdot k_l \cdot R_{k.2.8} \cdot \min \left(1, \frac{t_2}{12d_{2.8}} \right)$$

$$R_{d.2.8} = 693.481 N$$

Tason suunnittelu: EN 1995-1-1

Yksinkertaistetun analyysin ehdot

Muotosuhde

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } 2 \leq \frac{L}{B} \leq 6 \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

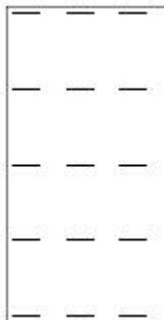
Levyjen on kiinnitystapa on suljettu
(standardin kohta 10.8.1 täyttyy)

Ei, joten mitoitusta ei tämän mukaan voida suorittaa.

Tason suunnittelu: RIL 205-1-2017

Tason leikkauskestävyyden määrittäminen

Levyjen kiinnitystapa nro 7. Kiinnitystapakertoimet:



$$\beta_i := \frac{8}{5 \cdot \left(\frac{h_i}{b_i} \right)^2} + \frac{12}{5} = 2.716$$

$$\gamma_i := \sqrt{\frac{36}{25} \cdot \left(\frac{h_i}{b_i} \right)^2} + \frac{16}{25} = 2.816$$

Yksittäisen levyn jäykkyyserroin

$$C_{i,v} := \frac{1}{\beta_i \cdot \left(s_i \cdot \frac{h_i^2}{K_{ser,i} \cdot b_i^3} + \frac{h_i}{b_i \cdot G_{mean,i} \cdot t_i} \right)}$$

$$C_{i,v} = 5.207 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

Levyjonossa olevien levyjen lukumäärä $n := 7$

Tässä tapauksessa jonossa olevat levyt ovat identtisiä.

Jonon jäykkyyserroimien
summa

$$C_v := n \cdot C_{i,v} = 3.645 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

Levyjonoa kuormittava
vaakavoima tason päädyssä

$$F_{v,Ed} := V_d = 43.2 \cdot \text{kN}$$

Yksittäistä levyä kuormittava
vaakavoima

$$F_{i,v,Ed} := \frac{C_{i,v}}{C_v} \cdot F_{v,Ed} = 6.171 \cdot \text{kN}$$

Kiinnitysliittimen
leikkausvoimakestävyyden
mitoitussarvo

$$F_{fRd,i} := R_d \cdot 2.8 = 693.481 \text{ N}$$

Tason leikkausvoimakestävyys

$$F_{i,v,Rd} := F_{fRd,i} \cdot \frac{b_i}{\gamma_i \cdot s_i} = 2.955 \cdot \text{kN}$$

Ehto

$$\left| \begin{array}{ll} \text{"OK"} & \text{if } \frac{F_{i,v,Ed}}{F_{i,v,Rd}} \leq 1 \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"EI"}$$

Käyttöaste

$$K_{RIL} := \frac{F_{i,v,Ed}}{F_{i,v,Rd}} = 2.088$$

Leikkaus- ja lommahdustarkastelu

Levyn leikkausjännitys

$$\tau_{d,i} := 1.5 \cdot \frac{F_{i,v,Ed}}{b_i \cdot t_i} = 0.514 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Levyn tukien k-jako, pituussuunta

$$a_i := 675 \text{ mm}$$

Lommahdusapukerroin,
täysponttisaumat

$$k_1 := 4$$

Lommahdusapukerroin

$$k_2 := 2 \cdot \frac{G_i}{E_i} = 0.438$$

Lommahduskerroin käyrästä

$$k := 1.1$$

Kriittinen leikkausjännitys
lommahduksen suhteen

$$f_{v,crit,i} := 3.3 \cdot k \cdot E_i \cdot \left(\frac{t_i}{a_i} \right)^2 = 7.512 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ehto

$$\left| \begin{array}{ll} \text{"OK"} & \text{if } \tau_{d,i} \leq \min(f_{v,crit,i}, f_{v,d,i}) \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"OK"}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau_{d,i}}{\min(f_{v,crit,i}, f_{v,d,i})} = 0.083$$

Taivutusjännitystarkastelu

Kun levyjen kiinnitystapa on avoin ja tukemattomilla reunoilla on täysponttisaumat, tulee lommahdustarkastelun lisäksi tehdä taivutusjännitystarkastelu.

Kiepahduskertoimen määrittäminen:

$$E_{0.05} := E_i$$

$$G_{0.05} := G_i$$

Neliömomentti heikommassa suunnassa

$$I_z := \frac{b_i \cdot t_i^3}{12} = 3.375 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Vääntöneliömomentti

$$I_{\text{tor}} := \frac{1}{3} \cdot t_i \cdot b_i^3 = 8.64 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

Palkin tehollinen pituus

$$l_{\text{ef}} := a_i = 0.675 \text{ m}$$

Vahvemman suunnan taivutusvastus

$$W_y := \frac{t_i \cdot b_i^3}{12 \cdot \frac{b_i}{2}} = 3.6 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

Kriittinen taivutusjännitys

$$\sigma_{\text{m.crit}} := \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{0.05} \cdot I_{\text{tor}}}}{l_{\text{ef}} \cdot W_y} = 1.369 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Levyn suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{\text{rel.m}} := \sqrt{\frac{f_{\text{m.0.k}}}{\sigma_{\text{m.crit}}}} = 0.346$$

Mitan a-pituusena ulokepalkina toimivan levyn kiepahduskerroin

$$k_{\text{crit}} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{\text{rel.m}} \leq 0.75 \\ (1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{\text{rel.m}}) & \text{if } 0.75 < \lambda_{\text{rel.m}} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{\text{rel.m}}^2} & \text{if } 1.4 < \lambda_{\text{rel.m}} \end{cases} = 1$$

Levyn tukemattomien reunojen välinen etäisyys

$$c_i := 1200 \text{ mm}$$

Levyn taivutusjännitys

$$\sigma_{\text{b.i}} := \frac{6 \cdot F_{\text{f.Rd.i}} \cdot a_i}{t_i \cdot c_i \cdot \gamma_i \cdot s_i} = 0.554 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ehto

$$\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_{\text{b.i}} \leq \min(f_{\text{t.0.d}}, k_{\text{crit}} \cdot f_{\text{c.0.d}}) \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Palkeissa vaikuttava normaalivoima (veto)

$$N_{\text{t.Ed}} := \frac{M_{\text{d}}}{B} = 27.771 \cdot \text{kN}$$

Palkissa vaikuttava vetojännitys

$$\sigma_{\text{t.d}} := \frac{N_{\text{t.Ed}}}{A_{\text{palkki}}} = 3.174 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ehto

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,0,d,C24}} \leq 1 = \text{"OK"} \\ \text{"EI"} \text{ otherwise} \end{array} \right|$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,0,d,C24}} = 0.259$$

Palkkien jatkoksia ei tässä yhteydessä määritetä, sillä menetelmä ei huomio niiden vaikutusta tason siirtymään tai kestävyys.

Siirtymän määrittäminen

Tason keskimääräinen leikkausvoima

$$Q_{\text{mean}} := \frac{q \cdot L}{4} = 21.6 \cdot \text{kN}$$

Levyjonojen lukumäärä

$$n_{\text{jono}} := 8$$

Yksittäisen levyjonon siirtymä

$$\omega_{i,\text{jono}} := \frac{Q_{\text{mean}}}{C_v} = 5.926 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä jännevälillä keskellä

$$\omega_{\text{mean}} := \frac{n_{\text{jono}} \cdot \omega_{i,\text{jono}}}{2} = 23.703 \cdot \text{mm}$$

Taivutusmomentista aiheutuva siirtymä

$$\omega_m := \frac{\left(5 \cdot M_d \cdot L^2 \right)}{24 \cdot B^2 \cdot A_{\text{palkki}} \cdot E_{0,\text{mean},C24}} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Tason kokonaissiirtymä jännevälillä keskellä

$$\omega_{\text{tot}} := \omega_{\text{mean}} + \omega_m = 27.042 \cdot \text{mm}$$

Tason suunnittelu: Ruotsi (Design of timber structures)

Eurokoodin tapaan suunnitteluohjeen ehtona on levyjen suljettu kiinnitystapa.

Tason suunnittelu: USA (Design of Wood Structures)

Siirtymän määrittäminen

Menetelmä 1: muutosuhdetarkastelu

Puurakenteiset, suljetulla kiinnitystavalla kiinnitetyt jäykistyslevyt

Ehto

$$\left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \text{ if } \frac{L}{B} \leq 4 = \text{"OK"} \\ \text{"EI"} \text{ otherwise} \end{array} \right|$$

Menetelmän mukaan taipumaa ei tarvitse määrittää laskennallisesti.

Määritetään taipuman suuruus vertailun vuoksi toisella menetelmällä.

Reunapalkkien jatkokset

Menetelmässä huomioidaan reunapalkkien jatkoksien liukumien vaikutus tason siirtymään.

Valitaan jatkoksien määrä / palkki.
(6 m pitkä sahatavara)

$$n_{\text{jatkos}} := 3$$

Oletetaan, että kaikissa jatkoksissa vaikuttaa suurin reunapalkkeissa vaikuttava vetovoima.
(Varman puolella oleva yksinkertaistus)

Käytettävä liitintyyppi: konenaula 3.1x90

Halkaisija $d_{3.1} := 3.1 \text{ mm}$

Tunkeumasyydydet $t_1 := 50 \text{ mm}$

$$t_2 := 90 \text{ mm} - t_1 = 40 \text{ mm}$$

Tunkeumasyydyden ehto
$$\left| \begin{array}{ll} \text{"KAAVA 8.5.1S"} & \text{if } \left| \begin{array}{l} t_1 \geq 8 \cdot d_{3.1} \\ t_2 \geq 12 \cdot d_{3.1} \end{array} \right. \\ \text{"EI"} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"KAAVA 8.5.1S"}$$

Liittimen ominaisleikkauskestävyys $R_k := 120 \cdot \left(\frac{d_{3.1}}{\text{mm}} \right)^{1.7} \cdot \text{N} = 821.289 \text{ N}$

Sahatavaralla C24 $k_\rho := 1$

Korotuskerroin
$$k_{t,1} := \max \left[\left[1 + 0.3 \cdot \frac{(t_1 - 8 \cdot d_{3.1})}{8 d_{3.1}} \right], \left[1 + 0.3 \cdot \frac{(t_2 - 12 \cdot d_{3.1})}{6 \cdot d_{3.1}} \right] \right]$$

 $k_{t,1} = 1.305$

Rajoitus $k_t := \min(k_{t,1}, 1.1) = 1.1$

Liittimen mitoitusleikkauskestävyys $R_d := \frac{k_{\text{mod.C24}}}{\gamma_{\text{M.liitos}}} \cdot k_\rho \cdot k_t \cdot R_k = 764.431 \text{ N}$

Liitoksen naulamäärä $n := \frac{N_{t.Ed}}{R_d} = 36.33$

Valitaan $n := 40$

Yksittäiseen naulaan vaikuttava leikkausvoima $F_{\text{naula}} := \frac{N_{t.Ed}}{n} = 694.286 \text{ N}$

Yksittäisen jatkoksen liittimien liukuma
$$\Delta_c := \left[0.013 \cdot \frac{\left(\frac{F_{\text{naula}}}{\text{N}} \right)^2}{\left(\frac{d_{3.1}}{\text{mm}} \right)^2} \right] \text{ mm} = 0.882 \cdot \text{mm}$$

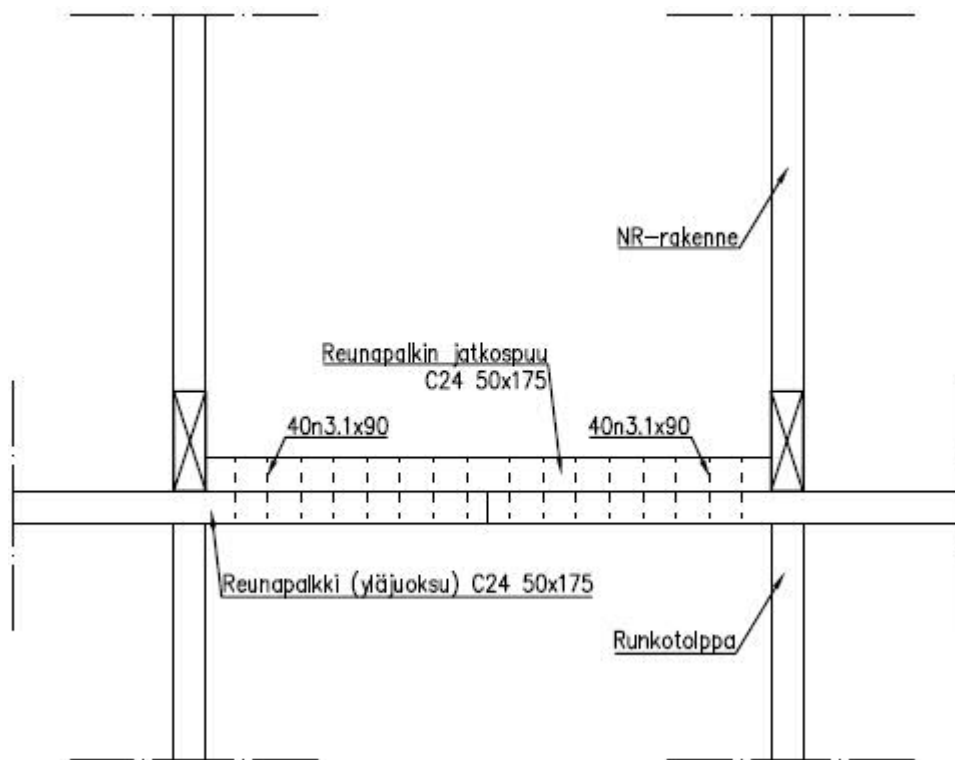
Jatkoksien etäisyydet tason päädyistä

Jatkos 1 ja 3 $x_{1,3} := 5.4 \text{ m}$

Jatkos 2 $x_2 := 2 \cdot 5.4 \text{ m} = 10.8 \text{ m}$

Mitoituksessa tulee huomioida jatkettavien reunapalkkien molemmat osat. Tässä tapauksessa otetaan huomioon vain vetopuolen jatkokset.

Reunapalkkien jatkoksien toteutus



Siirtymän määrittäminen

Liukumoduuli levyn
leikkausmuodonmuutoksesta ja
liittimen liukumasta (taulukkoarvo)

$$G_a := 8.5 \frac{\text{kip}}{\text{in}}$$

Tason suurin leikkausvoima
pituusyksikköä kohden

$$v := \frac{q \cdot L}{2 \cdot B} = 5.143 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Siirtymä tason jännevälillä keskellä

$$\delta_{\text{dia}} := 5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} + 0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{G_a} + \frac{[(2 \Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B}$$

$$\delta_{\text{dia}} = 24.263 \cdot \text{mm}$$

Avataan taipuman osatekijät vertailun vuoksi:

Taivutusmomentista aiheutuva
taipuma

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva
taipuma

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{G_a} = 18.656 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva taipuma

$$\frac{[(2 \Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Leikkauskestävyyden määrittäminen

Tason leikkauskestävyys määritetään SDPWS 2015 taulukon 4.2C mukaan.

Taulukosta valitaan leikkauskestävyyden ominaisarvo annettujen reunaehtojen mukaan:

Valitaan levyn paksuudeksi
lähin mahdollinen arvo 19/32 in.

$$t := \frac{19}{32} \text{ in}$$

SI-yksikköinä

$$t = 15.081 \cdot \text{mm}$$

Valitaan liitinjako muista ohjeista poiketen 6 in, koska taulukkomitoitus ei mahdollista muiden liitinjakojen käyttöä avoimella kiinnitystavalla.

$$s := 6 \text{ in}$$

SI-yksikköinä

$$s = 152.4 \cdot \text{mm}$$

Leikkauskestävyyden arvo luetaan taulukon B (wind) sarakkeesta, kuormitustapauksille 5 ja 6 (Cases 5&6).

Tason leikkauskestävyyden ominaisarvo
pituusyksikköä kohden

$$v_w := 600 \text{ plf}$$

SI-yksikköinä

$$v_w = 8.756 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Valitaan suunnitteluperusteeksi LRFD (Load and Resistance Factor Design), joka huomioi rakenteiden ja kuormitusten ominaisuuksia. HUOM! Suunnitteluperusteet ovat erilaiset kuin eurokoodistandardeissa, jonka vuoksi kestävyiden arvo ei ole suoraan vertailtavissa muihin menetelmiin.

Leikkauskestävyyden ominaisarvoa
tulee redusoida kertoimella

$$\phi_D := 0.80 \quad (\text{SDPWS 2015, luku 4.2.3})$$

Leikkauskestävyyden
mitoitusarvo pituusyksikköä
kohden

$$v_{w.d} := \phi_D \cdot v_w = 7.005 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Käyttöaste

$$K_{USA} := \frac{\frac{q \cdot L}{2B}}{v_{w.d}} = 0.734$$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Päädytään samaan lopputulokseen kuin EN 1995-1-1, ei toisteta tässä yhteydessä.

Huomioitavaa:

Tason leikkauskestävyyden arvo ei ole sellaisenaan verrattavissa eurokoodistandardien mukaisiin menetelmiin, sillä arvoa tulee redusoida suunnittelumenetelmästä riippuen erilaisilla kertoimilla. (ASD ja LRFD-menetelmät).

Tason kuormitustapaukset ovat rajallisia, minkä vuoksi kaikkia tason rakenteiden suunnittelu ei ole mahdollista. Lisäksi liitinjako on rajattu 6 tuumaan avoimella kiinnitystavalla.

Tason rakenneosien (levyt ja liittimet) dimensiot ovat USA:n mittayksiköissä, minkä vuoksi näissä on pieniä eroja verrattuna tason lähtötietojen SI-yksiköiden mukaisiin valintoihin. Esim. taulukon mukaan levyjen kiinnityksessä on käytetty 10d nauloja, jotka ovat n. 3,8 mm paksuja. Tämä on merkittävä ero alkuperäiseen valintaan.

Taulukoissa ei ole mahdollista huomioida erilaisia kiinnitysrunkomateriaaleja, millä on vaikutusta liitoksen kestävyteen.

Tason suunnittelu: Kanada (Wood design manual 2015)

Leikkauskestävyyden määrittäminen

Suunnitteluohje antaa reunaehdot, joiden toteutuessa voidaan kestävyysnäyttää suoraan taulukkoarvoa:

Kuoman aikaluokka lyhytkestoinen	OK, Kanadassa tuulikuorma kuuluu tähän luokkaan.
Käyttöolosuhde kuiva ja käytettävä puurunkomateriaali kuivattu ennen työstämistä alle 19% kosteuspitoisuuteen	OK
Materiaaleissa ei käytetä lujuutta heikentäviä kemikaaleja	OK
Liitinnivejä on yksi ja puurungon paksuus on 64 mm	EI
Levyjen kiinnitystapa on suljettu	OK

Taulukkoarvoa tulee muokata lisäkertoimilla.

Lujuuskerroin levyjäykistystasolle $\varphi := 0.80$

Liitinkerroin levyjäykistystasojen naulaliitoksille $J_D := 1.3$

Liitinjakokerroin
$$J_s := \begin{cases} 1 & \text{if } s_i \geq 150\text{mm} \\ \left[1 - \left[\frac{(150\text{mm} - s_i)}{150\text{mm}} \right]^{4.2} \right] & \text{if } 50\text{mm} \leq s_i < 150\text{mm} \end{cases}$$
$$J_s = 0.99$$

Kiinnikerivikerroin kun yksi kiinnitysrivi/runko ja kiinnitysrungon paksuus min. 38mm $J_f := 0.89$

Lujuuskerroin levyille, joiden kiinnitystapa on avoin $J_{ud} := 0.67$

Määritetään leikkauskestävyyden arvo taulukosta (naulahalkaisija 2.84 mm):

Runkomateriaali	
D.Fir-L	$V_{d.1} := 7.06 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Hem-Fir	$V_{d.2} := 6.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
S-P-F	$V_{d.3} := 6.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Northern	$V_{d.4} := 6.42 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Suomalaisen sahatavaran C18 tiheys on lähimpänä northern-puumateriaalia.

Tiheys, northern $\rho_{\text{northern}} := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Canadian Wood Council)

Leikkauskestävyys
pituusyksikköä kohden

$$V_{rd} := \varphi \cdot J_D \cdot J_S \cdot J_F \cdot J_{ud} \cdot V_{d.4} = 3.942 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Käyttöaste

$$K_{CAN} := \frac{\left(q \cdot \frac{L}{2 \cdot B} \right)}{V_{rd}} = 1.305$$

Lomahdustarkastelu taulukkoarvoilla:

Runkomateriaali

D.Fir-L

$$V_{rd.1} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Hem-Fir

$$V_{rd.2} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

S-P-F

$$V_{rd.3} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Northern

$$V_{rd.4} := 29.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Samat arvot runkomateriaalista riippumatta. Taulukoissa on oletettu levyn pituudeksi 2440 mm ja leveydeksi 1220 mm, mikä vaikuttaa lomahduskestävyyden arvoon. Havaitaan kuitenkin, että lomahdus ei tässä tapauksessa tule mitoittavaksi tekijäksi.

Taipuman määrittäminen:

Liittimen liukuma levyn
kiinnityksessä

$$e_n := \left[\frac{\left(\frac{0.013 \cdot \frac{v}{N} \cdot \frac{s_i}{\text{mm}}}{\text{mm}} \right)^2}{\left(\frac{d_{2.8}}{\text{mm}} \right)^2} \right] \cdot \text{mm} = 0.727 \cdot \text{mm}$$

Levyn liukumoduuli (shear though
thickness rigidity, CSA O86, table
9.3C)

$$B_v := 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Taipuma tason jännevälillä keskellä

$$\Delta_d := \frac{5 \cdot v \cdot L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} + 0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{B_v} \dots$$

$$+ \frac{0.00061}{\text{mm}} \cdot L \cdot e_n + \frac{\left[(2 \Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2 \right]}{2 \cdot B}$$

$$\Delta_d = 17.713 \cdot \text{mm}$$

Avataan taipuman osatekijät vertailun vuoksi:

Taivutusmomentista aiheutuva
taipuma

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0.\text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva
taipuma

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{B_v} = 2.525 \cdot \text{mm}$$

Levyn kiinnitysliittimien liukumista
aiheutuva taipuma

$$\frac{0.00061}{\text{mm}} \cdot L \cdot e_n = 9.582 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva taipuma

$$\frac{[(2\Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien suunnittelu

Mitoitetaan vetovoimalle, joka on määräävä sahatavaralla.

Päädytään samaan lopputulokseen kuin EN 1995-1-1, ei toisteta tässä yhteydessä.

Huomioitavaa:

Tason kuormitustapaukset ovat rajallisia, minkä vuoksi kaikkien tasorakenteiden suunnittelu ei ole mahdollista

Tason suunnittelu: kimmoteoriaan perustuva suunnittelumenetelmä (Leskelä 2005)

Levykentän jakaantuminen:

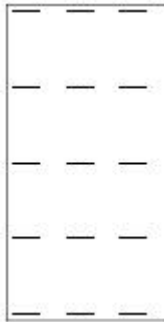
Yksittäisten levyjen lukumäärä
tason leveyssuunnassa

$$n := 7$$

Puolet levyjen lukumäärästä tason
pituussuunnassa

$$m := 4$$

Levyt kiinnitetään kohtisuoraan kuormitukseen nähden kiinnitystavalla 7 (Liite 8).
Kiinnitystavakertoimet taulukosta:



$$\alpha := 6.976 \cdot \frac{10^{-5}}{\text{mm}}$$

$$\beta := 12.68 \cdot \frac{10^{-8}}{\text{mm}^2}$$

Liittimissä vaikuttavan
leikkausvoiman maksimiarvo

$$F_{\max} := \frac{\alpha \cdot h_i \cdot L \cdot q}{2 \cdot n} = 1.162 \times 10^3 \cdot \text{N}$$

Liittimen mitoitusleikkauskestävyys

$$R_d := \frac{k_{\text{mod.OSB}}}{\gamma_{\text{M.liitos}}} \cdot k_l \cdot R_k \cdot \min \left(1, \frac{t_2}{12d_{2.8}} \right) = 693.481 \text{ N}$$

Käyttöaste

$$K_{\text{LESKELÄ}} := \frac{F_{\max}}{R_d} = 1.676$$

Siirtymän määrittäminen

Siirtymä tason jännevälin keskellä

$$u := \left(\beta \cdot \frac{h_i^2}{K_{\text{ser},i}} + \frac{h_i}{t_i \cdot B \cdot G_{\text{mean},i}} \right) \cdot \frac{m \cdot L \cdot q}{4 \cdot n} = 15.61 \cdot \text{mm}$$

Tuloksien vertailu

Leikkauskestävyys

Verrataan leikkauskestävyyksien käyttöasteita.

EN 1995-1-1	Ei mahdollista suunnitella
RIL 205-1-2017	$K_{RIL} = 2.088$
Ruotsi (Design of timber structures)	Ei mahdollista suunnitella
USA (Design of Wood Structures)	$K_{USA} = 0.734$
Kanada (Wood design manual 2015)	$K_{CAN} = 1.305$
Kimoteoriaan perustuva suunnittelumenetelmä (Leskelä 2005)	$K_{LESKELÄ} = 1.676$

Johtopäätökset leikkauskestävyydestä:

Huomataan, että avoimella kiinnitystavalla leikkauskestävyyksien käyttöasteet vaihtelevat huomattavasti suunnitteluohjeiden välillä. EN 1995-1-1:lla ja Ruotsin suunnitteluohjeella ei ole mahdollista suunnitella avoimella kiinnitystavalla muodostettua jäykistystasoa, mutta muut ohjeet tämän mahdollistavat. Edellisestä tasotapauksesta poiketen tässä tasossa kiinnitystapa muutettiin suljetusta avoimeksi, sekä kiinnitysrungon suunta käännettiin kuormituksen suuntaiseksi. Muut lähtötiedot pidettiin vakioina. Tuloksista huomataan, että tason kuormituskestävyys on huomattavasti heikompi tällä kokonaisuudella. Tähän vaikuttaa sekä kiinnitysrungon suunta, että suljetun kiinnitystavan muuttaminen avoimeksi.

RIL 205-1-2017 päätty konservatiivisimpaan käyttöasteeseen (208,8%).

USA:n ohjetta ei voida sellaisenaan vertailla edeltäviin tuloksiin, sillä leikkauskestävyyden arvoa tulee redusoida suunnittelumenetelmän perusteella, jotka poikkeavat eurokoodistandardeista. Tämän diplomityön puitteissa suunnitteluperusteiden eroihin ei perehdytty laajuudella, jolla vertailu olisi mahdollista luotettavasti suorittaa. Suunnitteluperuste-eroista huolimatta ohje on ainut, jonka mukaan taso olisi mahdollista toteuttaa sellaisenaan.

Kanadan ohjeen tulos on vertailtavissa, sillä menetelmä antaa kestävyysarvot, eikä näitä tule redusoida. Havaitaan, että Kanadan ohjeella määritetty käyttöaste pienempi kuin RIL 205-1-2017 ja Leskelän menetelmällä määritetyt käyttöasteet.

Siirtymä:

Verrataan tason kokonaissiirtymiä sekä näiden osatekijöitä.

EN 1995-1-1	Ei mahdollista suunnitella
RIL 205-1-2017	
Taivutusmomentista aiheutuva siirtymä	$\omega_m = 3.339 \cdot \text{mm}$
Leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä jännevälin keskellä	$\omega_{\text{mean}} = 23.703 \cdot \text{mm}$
Tason kokonaissiirtymä jännevälin keskellä	$\omega_{\text{tot}} = 27.042 \cdot \text{mm}$

Ruotsi (Design of timber structures)

Ei mahdollista suunnitella

USA (Design of Wood Structures)

Taivutusmomentista
aiheutuva siirtymä

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0, \text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva
siirtymä jännevälän keskellä

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{G_a} = 18.656 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva siirtymä

$$\frac{[(2\Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Tason kokonaissiirtymä
jännevälän keskellä

$$\delta_{\text{dia}} = 24.263 \cdot \text{mm}$$

Kanada (Wood design manual 2015)

Taivutusmomentista
aiheutuva siirtymä

$$5 \cdot v \cdot \frac{L^3}{96 \cdot E_{0, \text{mean.C24}} \cdot A_{\text{palkki}} \cdot B} = 3.339 \cdot \text{mm}$$

Leikkausvoimasta aiheutuva
siirtymä jännevälän keskellä

$$0.25 \cdot v \cdot \frac{L}{B_v} = 2.525 \cdot \text{mm}$$

Levyn kiinnitysluottimien liukumista
aiheutuva siirtymä

$$\frac{0.00061}{\text{mm}} \cdot L \cdot e_n = 9.582 \cdot \text{mm}$$

Reunapalkkien jatkoksien
liukumista aiheutuva siirtymä

$$\frac{[(2\Delta_c \cdot x_{1.3} + \Delta_c \cdot x_2) \cdot 2]}{2 \cdot B} = 2.268 \cdot \text{mm}$$

Tason kokonaissiirtymä
jännevälän keskellä

$$\Delta_d = 17.713 \cdot \text{mm}$$

Kimmoiteoriaan perustuva
suunnittelumenetelmä (Leskelä 2005)

Leikkausvoimasta aiheutuva
siirtymä jännevälän keskellä
= tason kokonaissiirtymä

$$u = 15.61 \cdot \text{mm}$$

Johtopäätökset siirtymästä:

Kaikki ohjeet jotka sisältävät yhtälöt tason siirtymän määrittämiseen ovat vertailukelpoisia keskenään. EN 1995-1-1:n ja Ruotsin ohje ovat vertailun ulkopuolella. Havaitaan, että tason kokonaissiirtymissä on merkittäviä vaihteluita eri ohjeiden välillä. Edellisestä tasorakenteesta poiketen tässä tapauksessa RIL 205-1-2017 ja USA:n ohje antavat suurimmat siirtymän arvot. (27,042 mm ja 24,263 mm). Kanadan ohje päättyy identtiseen tulokseen edellisen tasorakenteen kanssa, mistä voidaan päätellä menetelmän olevan tämän osalta puutteellinen. Leskelän suunnittelumenetelmä päättyy edellisen tasorakenteen tavoin pienimpään siirtymän arvoon. Analysoidaan kokonaissiirtymien eroja vertailemalla siirtymän osatekijöitä.

Levyjen kiinnitystavat ja kiinnitysrungon suunta eivät vaikuta taivutusmomentista aiheutuvaan osatekijään. Tästä syystä arvot ovat identtisiä edellisen tasotapauksen kanssa.

Leikkausvoimasta aiheutuvaa osatekijää on vaikeampi vertailla, sillä tämän laskentaperusteet ja sisältö vaihtelevat suunnitteluohjeiden välillä. RIL 205-1-2017 menetelmässä osatekijä perustuu levyjen jäykkyyksiin, kiinnitystapakertoimeen ja materiaalien ominaisuuksiin (23,703 mm). USA:n ohjeessa huomioidaan sekä levyn leikkausmuodonmuutos, että liittimen liukuma samassa osatekijässä käyttämällä näistä muodostettua liukumoduulia G_a (18,656 mm). Koska liukumoduulin G_a poimitaan mitoitusaulukosta, joka huomioi avoimen kiinnitystavan, muuttuu myös osatekijän arvo. Kanadan ohjeessa leikkausvoima vaikuttaa kahteen osatekijään; levyn muodonmuutokseen ja levyn kiinnityслиittimien liukumaan. Näiden osatekijöiden ominaisuuksissa ei huomioida avointa kiinnitystapaa, minkä vuoksi arvo on identtinen edellisen tasotapauksen kanssa. Leskelän suunnittelumenetelmässä leikkausvoimasta aiheutuva siirtymä on ainut osatekijä. Tämä perustuu levyjen kiinnitystapoihin ja materiaalien ominaisuuksiin (15,61 mm).

Reunapalkkien jatkoksien liukumasta aiheutuva osatekijä huomioidaan vain USA:n ja Kanadan ohjeessa, joissa tämä määritetään samoin perustein. Havaitaan, että tekijän suuruusluokka (2,268 mm) on tässä tasotapauksessa lähellä taivutusmomentista aiheutuvaa osatekijää, jonka vuoksi tämä tulisi ehdottomasti sisällyttää myös muihin suunnittelumenetelmiin.

Tuloksien yhteenveto

Tasotapaus 1, suljettu kiinnitystapa nro 2

Suunnitteluohje	Leikkauskestävyyden käyttöaste	Kokonaissiirtymä
EN 1995-1-1	74,2 %	-
RIL 205-1-2017	73,4 %	11,718mm
Ruotsi	74,2 %	-
USA	37,0 %	17,805mm
Kanada	87,4 %	17,713mm
Leskelä 2005	73,6 %	6,992mm

Tasotapaus 2, avoin kiinnitystapa nro 7

Suunnitteluohje	Leikkauskestävyyden käyttöaste	Kokonaissiirtymä
EN 1995-1-1	-	-
RIL 205-1-2017	208,8 %	27,042mm
Ruotsi	-	-
USA	73,4 %	24,263mm
Kanada	130,5 %	17,713mm
Leskelä 2005	167,6 %	15,610mm